

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

УДК 669.168
№ госрегистрации 01200905641
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ:
Ректор ФГАОУ ВПО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

_____ Кокшаров В.А.

« ____ » _____ 2011 г.

Государственный контракт от 15 июня 2009 г. № 02.740.11.0152
Шифр заявки «2009-1.1-233-032-007»

ОТЧЕТ
О НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

в рамках федеральной целевой программы
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

по теме:
«РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
МАССОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ»
(промежуточный, этап № 5)

Наименование этапа: «РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ
КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ»

ЧАСТЬ 1

Зам. проректора по науке УрФУ,
к-т физ.-мат. наук, доц.

С. В. Устелемов

подпись, дата

Руководитель темы

член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф.

Л. А. Смирнов

подпись, дата

Екатеринбург, 2011

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф.	Л. А. Смирнов (введение, выводы, заключение)
	подпись, дата
Исполнители темы:	
Проф., д-р техн. наук	Н. А. Спирин (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	С. А. Загайнов (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р хим. наук	А. Н. Ватолин (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	А. А. Богатов (разделы 3)
	подпись, дата
Доц., канд. техн. наук	С. П. Бурмасов (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	Ю. Г. Ярошенко (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	В. И. Жучков (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	А. Н. Дмитриев (раздел 3)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	А. А. Дерябин (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	А. В. Малыгин (раздел 1)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	В. А. Шилов (раздел 3)
	подпись, дата
Проф., д-р техн. наук	В. П. Швейкин (разделы 3)
	подпись, дата
Проф., канд. техн. наук	М. Д. Казяев (раздел 1)
	подпись, дата
Доц., канд. техн. наук	Л. Ю. Гилева (раздел 1)
	подпись, дата

Доц., канд. техн. наук		В. В. Лавров (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		Е. В. Киселев (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		О. В. Матюхин (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		А. Г. Гудов (раздел 1)
	подпись, дата	
Ст. науч. сотр., канд. техн. наук		В. А. Ровнушкин (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		А. В. Жданов (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		А. В. Климов (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		В. Н. Невидимов (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		А. М. Панфилов (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. хим. наук		Н. С. Семенова (раздел 1)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		В. В. Рогачев (раздел 1)
	подпись, дата	
Докторант, канд. техн. наук		А. В. Кушнарев (раздел 2)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		С. П. Буркин (раздел 2)
	подпись, дата	
Доц., канд. техн. наук		Д. Л. Шварц (раздел 2)
	подпись, дата	
науч. сотр, канд. техн. наук		Р. Ф. Исхаков (раздел 2)
	подпись, дата	
Науч. сотр., канд.техн.наук.		Р. А. Литвинов (раздел 2)
	подпись, дата	
Ст. преп.		А. И. Михайлов (раздел 1)
	подпись, дата	

Ст. преп.		Д. А. Попцов (раздел 1)
	подпись, дата	
Мл. науч. сотр.		С. А. Спирин (раздел 1)
	подпись, дата	
Мл. науч. сотр.		А. Л. Смирнов (раздел 1)
	подпись, дата	
Ассистент		А. А. Бурыкин (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		А. М. Вохмяков (разделы 1)
	подпись, дата	
Аспирант		С. Е. Собянин (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		И. С. Вохмякова (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		К. Г. Соловьев (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		Е. Г. Подковыркин (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		К. Ю. Эйсмодт (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		И. С. Берсенев (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		С. А. Скорняков (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		О. Н. Собянина (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		К. Б. Пыхтеева (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		М. В. Ерпалов (раздел 5)
	подпись, дата	
Аспирант		И. В. Лещев (раздел 5)
	подпись, дата	
Аспирант		Д. А. Витькин (раздел 3)
	подпись, дата	
Аспирант		Р. А. Ильиных (раздел 4)

	подпись, дата	
Аспирант		А. А. Пономарев (раздел 6)
	подпись, дата	
Аспирант		А. В. Ананьев (раздел 5)
	подпись, дата	
Аспирант		А. Н. Бабайлова (раздел 5)
	подпись, дата	
Аспирант		Я. А. Брынских (раздел 5)
	подпись, дата	
Инженер		А. В. Невидимов (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		К. А. Дубровина (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		Т. С. Коль (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		С. В. Кульпин (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		Е. Ю. Черемисина (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		А. А. Бессонов (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		О. И. Жданова (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		Л. Д. Арлаускас (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		Ю. В. Красноперова (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		Н. А. Перина (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		А. В. Кострыкина (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		М. С. Николаев (раздел 6)
	подпись, дата	
Студент		Д. А. Павлов (раздел 5)

	подпись, дата	
Студент		А. Г. Пьянков (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		А. Д. Белорыбкин (раздел 5)
	подпись, дата	
Соисполнители:		
Советник РАН, академик РАН, гл. науч. сотр.		Н. А. Ватолин (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Гл. науч. сотр., д-р. техн. наук		А. Н. Дмитриев (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Зав. лабораторией, д-р. техн. наук		Г. Н. Кожевников (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Вед. науч. сотр., д-р. техн. наук		А. Г. Водопьянов (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Вед. науч. сотр., д-р. техн. наук		Б. Д. Халезов (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Науч. сотр.		А. Г. Крашенинин (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Ст. науч. сотр. канд. техн. наук		Ю. А. Чесноков (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Мл. науч. сотр.		З. Н. Пастухова (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Аспирант		Г. Ю. Аржадеева (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН
	подпись, дата	
Аспирант		Ю. П. Лазебная (раздел 1) ИМЕТ УрО РАН

	подпись, дата	
Студент		В. А. Аксенов (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		И. Н. Бажуков (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		А. А. Ершов (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		П. А. Ибрагимов (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		А. Н. Коваленко (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		Д. Ш. Нухов (раздел 5)
	подпись, дата	
Проф., д-р техн. наук		С. В. Паршин (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		А. Ю. Пяткова (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		Е. С. Хурматулина (раздел 5)
	подпись, дата	
Студент		А. А. Воробьева (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		А. Ю. Епишин (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		Д. А. Жидков (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		А. С. Истомин (раздел 1)
	подпись, дата	
Студент		М. Г. Сухоросов (раздел 1)
	подпись, дата	
Аспирант		А. А. Кийк (раздел 1)
	подпись, дата	
Нормоконтролер		А. А.Бурыкин
Ассистент		
	подпись, дата	

РЕФЕРАТ

Отчет 220 с., 2 ч., 91 рис., 4 табл., 67 источников.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПРЕССОВАНИЕ, ПРОКАТКА, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТРУБ

С учетом требований инженерно-технологического персонала и использованием системного подхода разработана функциональная модель и произведена структурная декомпозиция автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха. Создано математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение системы. Разработаны архитектура и структура программных модулей позволяющих формировать полный набор отчетных показателей работы доменных печей и цеха и решать комплекс технологических задачи по управлению тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной плавки. Сформулирована общая последовательность решения задач оптимального распределения инжестируемого топлива в группе доменных печей, с учетом индивидуальных особенностей теплового, газодинамического и шлакового режимов работы доменных печей, а также их конструктивных и режимных параметров, изменений конъюнктуры рынка. Разработаны соответствующее математическое, алгоритмическое и программное обеспечения.

Создана математическая модель, программное обеспечение температурного режима совмещенного процесса прессования – прокатки – термической обработки труб, структура системы и алгоритм управления формоизменением сечения трубы и температурой трубы на входе в закалочное устройство. Предложена двухуровневая система автоматического управления температурно-скоростным режимом и натяжениями как на выходе из пресса, так и межклетевыми гарантирующая обеспечение на выходе из прокатного стана требуемой толщины стенки трубы. Установлено, что структура системы и алгоритм управления, быстро реализуемый традиционными программными средствами. Это позволяет до минимума сократить количество датчиков оперативной информации и повысить быстродействие и надежность системы управления.

Проведено патентное исследование по исследованию металлических и оксидных расплавов, определения их физико-химических свойств, таких как вязкость, плотность, поверхностное натяжение.

Новые разработки в области исследования структуры и свойств металлических и шлаковых расплавов, инженерных расчетов температурных полей в доменной печи,

использования информационно-моделирующих систем для управления доменным процессом, извлечения ценных компонентов ванадия и титана при переработке титано-магнетитового сырья использованы для совершенствования образовательного процесса.

Работа выполнена по государственному контракту от 15.06.2009 г. № 02.740.11.0152 «Разработка новой комплексной металлургической технологии производства высококачественных стальных изделий массового назначения» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» на 2009 – 2013 годы.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	12
1. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ И ИХ КОМПЛЕКСОВ	15
1.1. Структура системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха	15
1.1.1.Современные тенденции развития компьютерных систем поддержки принятия решений для решения задач MES-уровня в металлургии	15
1.1.2. Функциональная модель автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха.....	23
1.1.3. Разработка структуры подсистемы сбора, первичной обработки и хранения данных	37
1.1.4. Разработка структуры подсистемы визуализации данных о работе доменной печи	39
1.1.6. Разработка структуры подсистемы сопоставительного анализа работы доменных печей и цеха	42
1.1.7. Разработка структуры подсистем модельной поддержки принятия решений, диагностики работы доменных печей и прогнозирования технологических ситуаций	43
1.2. Математическое обеспечение решения задач по управлению комплексом доменных печей	46
1.2.1. Математическое обеспечение подсистемы формирования отчетных данных о работе доменных печей и цеха.....	46
1.2.3. Математическое обеспечение подсистемы оптимального распределения топливо - энергетических ресурсов в комплексе доменных печей	88
1.3. Разработка программных приложений для решения задач управления комплексом доменных печей	101
1.3.2. Реализация и описание подсистемы формирования технического отчета доменного цеха	106
1.3.3. Реализация и описание подсистемы сопоставления отчетных показателей работы доменного цеха	115
1.4. Список использованных источников.....	149

2. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОВМЕЩЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ПРЕССОВАНИЯ-ПРОКАТКИ- РЕГЛАМЕНТИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ	151
2.1. Температурная модель процесса передачи горячепрессованного профиля от прессы к прокатному стану.....	155
2.2. Температурная модель непрерывного прокатного стана	164
2.3. Температурная модель линии охлаждения катаных профилей	170
2.4. Деформационно-скоростная модель непрерывного стана	174
2.5. Структура системы управления совмещенным процессом прессования-прокатки-регламентированного охлаждения профилей и труб	186
2.6. Список использованных источников.....	193
3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ».....	194
3.1. Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс ..	194
3.1.1. Разработки, полученные в ходе выполнения данного проекта, включаемые в образовательный процесс	194
3.1.2. Программы курсов по специальным дисциплинам для бакалавров и магистров по направлению металлургия, в которых использованы разработки по данному проекту	206
3.2. Разработка научно-методических материалов по дисциплине «Высокие технологии в металлургии»	207
3.3. Список использованных источников.....	215
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	217
ПРИЛОЖЕНИЕ	217

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке для поиска путей энергетического совершенствования современных и перспективных технологических процессов в металлургии, в том числе и с учетом экологических факторов, требуется перейти на новые идейные и концептуальные основы. Такой фундаментальной направляющей концепцией является концепция управляемого взаимодействия потоков энергии, вещества и информации. Хотя в настоящее время в технологическом обороте находится ранее небывалый объем вещественно-энергетических ресурсов, однако в сформулированной здесь концепции на первое место все же выдвигаются информационно-управляющие процессы. Суть дела состоит в том, что именно информация и управление позволяют эффективно овладеть этими ресурсами, рационально извлечь их из природной среды, а затем оптимально использовать в соответствующих технологических процессах.

Период экономического финансового кризиса характеризуется нестабильным спросом на металлопродукцию, изменением условий снабжения предприятий железорудными материалами и коксом, а также изменением цен на сырье и железнодорожные тарифы. В настоящее время все более очевидной становится роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области металлургии MES-уровня (Manufacturing Execution Systems – системы управления технологией, производственными процессами) автоматизированных информационных систем крупнейших металлургических предприятий России. В современных условиях решение этих задач прежними методами, т.е. путем организации очень длительных, дорогостоящих крупномасштабных опытных плавов, экспериментального изучения агрегатов сопряжено с большими финансовыми, технологическими и техническими трудностями, а при напряженности рынка железорудного сырья и кокса не только экономически нецелесообразно, но и просто невозможно. В связи этим основным методом решения подобных проблем является метод математического моделирования и создание соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения, предназначенного для MES-уровня информационно-моделирующей системы металлургического производства.

Это определило потребность в разработке специализированного программного обеспечения информационно-моделирующих систем, в основу которого положен комплекс математических моделей, учитывающих как теорию тепло- и массообмена, законы сохранения энергии, физико-химию процесса, так и особенности влияния технологических и стандартных характеристик сырья на показатели производственного процесса.

Цель пятого этапа исследований заключалась в разработке принципов построения и реализации компьютерных систем поддержки принятия решений по проектированию и управлению технологическими процессами и металлургическими агрегатами, обеспечивающих получения высококачественных стальных изделий:

Техническим заданием предусмотрена разработка:

- информационно-моделирующих систем по управлению технологическими режимами выплавки чугуна в доменных печах и их комплексов;
- практических рекомендаций и опытно-промышленные испытания компьютерных систем поддержки принятия решений по управлению технологическими процессами в металлургии;
- принципов построения и структуры системы управления совмещенным процессом прессования-прокатки-регламентированного охлаждения профилей и труб;
- программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс. Разработка научно-методических материалов по дисциплине «Высокие технологии в металлургии».

Специализированное программное обеспечение MES–уровня информационно-моделирующих систем обеспечивает:

- повышение экономичности выплавки чугуна за счет принятия своевременных и корректных (правильных) решений по управлению технологией доменной плавки;
- улучшение культуры управления производством, улучшение условий труда и информированности оперативного и производственного персонала;
- прогнозирование работы отдельных печей и цеха в целом при колебаниях сырьевых и дутьевых параметров, изменений конъюнктуры рынка и технического состояния оборудования;
- высокий уровень интеграции системы с существующими производственными и корпоративными системами крупного металлургического предприятия;
- предоставление инженерно-технологическому персоналу детализированной информации для оценки показателей работы, экономической эффективности работы, технического состояния оборудования отдельных печей, агрегатов и цеха в целом;
- сокращение времени поиска необходимой информации за счет реализации дружественного клиентского интерфейса;
- формирование необходимой по запросу пользователя отчетной документации;
- создание условий для последующего совершенствования и развития системы.

Выполнение пятого этапа предусматривает разработку программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс и разработку научно-методических материалов по дисциплине «Высокие технологии в металлургии».

1. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ И ИХ КОМПЛЕКСОВ

1.1. Структура системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха

1.1.1. Современные тенденции развития компьютерных систем поддержки принятия решений для решения задач MES-уровня в металлургии

Сегодня современные АСУ ТП доменной плавки представляют собой сложные системы, различающиеся по структуре, назначению, целям и техническим особенностям реализации, имеющие иерархическую, многоуровневую, открытую, распределенную структуру [19, 20]. Каждый уровень в соответствии с рисунком 1.1 отличается своими функциями, характеристиками и используемыми моделями, программно-аппаратными средствами.

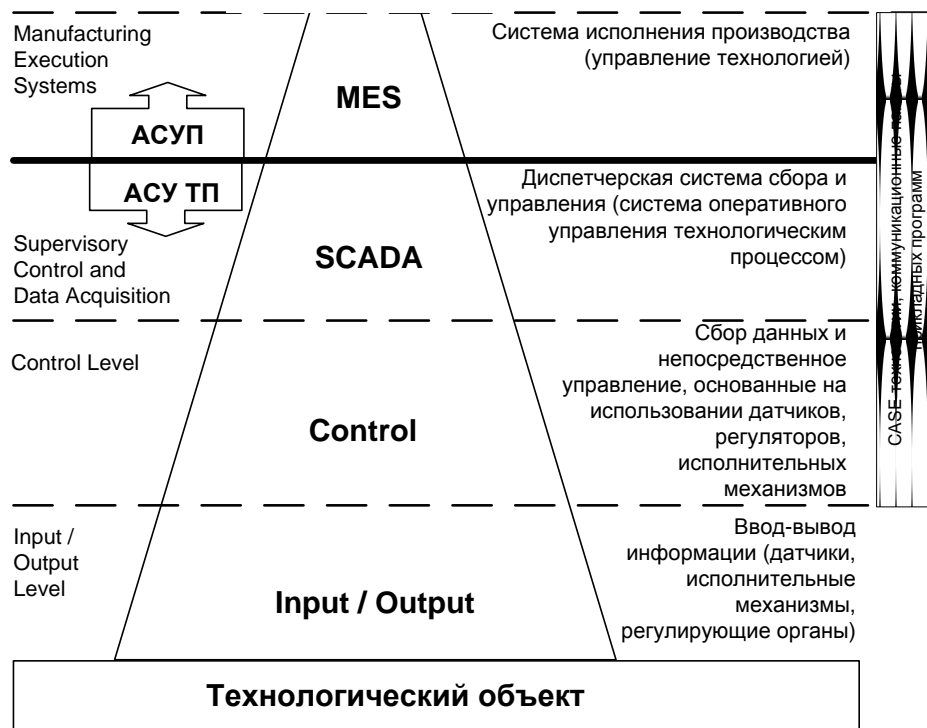
Первый, нижний уровень. Инструментальная система на базе КИПиА. Представляет собой набор датчиков, исполнительных механизмов и других устройств, предназначенных для сбора первичной информации и реализации управляющих воздействий. Этот уровень называется I/O (Input/Output, ввод/вывод).

Второй уровень. Control Level – простое управление (базовая автоматизация). Уровень предназначен для непосредственного управления производственным процессом с помощью различных устройств связи с объектом (УСО), программируемых логических контроллеров (PLC – Programmable Logic Controller).

Третий уровень. Супервизорная система, называемая SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – буквально сбор данных и диспетчерское управление). На уровне SCADA Level осуществляются диспетчеризация систем сбора данных и оперативное управление технологическим процессом, принимаются тактические решения, прежде всего направленные на достижение стабильности процесса.

Четвертый уровень. Подсистема управления комплексом доменных печей. Уровень MES (Manufacturing Execution Systems – или системы управления технологиями, исполнения производства). Этот уровень выполняет упорядоченную обработку и хранение информации о ходе процессов в различных доменных печах цеха, обеспечивает управление комплексом доменных печей (цеха в целом),

Уровни автоматизированной информационной системы



Программное обеспечение

Технические средства

Модели

СУБД SQL Server, APM специалистов управления технологией. Операционные системы общего назначения	Сетевое оборудование Internet/Intranet (шлюзы, маршрутизаторы, коммутаторы), ПК общего назначения	Полные математические модели технологического процесса, оптимизационные модели управления технологией
СУБД SQL Server, Access, ППП SCADA (InTouch, WinCC), операционные системы общего назначения, APM оперативно-технического персонала	Сетевое оборудование локальных сетей (коммутаторы, концентраторы), ПК общего назначения.	Упрощенные математические модели технологического процесса, модели реального времени
Операционные системы реального времени (OS-9, QNX и др.), СУБД реального времени (Industrial SQL Server и др.), программное обеспечение программируемых контроллеров (InControl, ISaGRAF)	Оборудование промышленных сетей (field level), программируемые логические контроллеры (PLC) (Siemens, Smart и др.), промышленные компьютеры.	Линейные, нелинейные динамические модели локальных систем управления. Цифровые модели локального управления
	Оборудование промышленных сетей (sensor/actuator level, интеллектуальные датчики, исполнительные механизмы)	Модели сбора и первичной обработки технологической информации

Рисунок 1.1 - Уровни и соответствующие математические модели, программное и техническое обеспечение информационно-моделирующей системы доменной плавки

а также является источником необходимой информации в реальном времени для более высокого, самого верхнего уровня управления. Данный уровень характеризуется необходимостью решения задач оперативной упорядоченности первичной информации из цеха и передачи этой информации на верхний уровень планирования ресурсов всего предприятия. Решение этих задач на данном уровне управления обеспечивает оптимизацию управления ресурсами цеха как единого организационно-технологического комплекса по заданиям, поступающим с верхнего уровня, и при оперативном учете текущих параметров, определяющих состояние объекта управления.

Автоматизированный технологический комплекс доменной печи как объект контроля и управления характеризуется следующими признаками:

- большим объемом контролируемых переменных и расчетных параметров;
- низкой прозрачностью процесса, из-за отсутствия возможности непосредственного контроля развития отдельных стадий процесса выплавки чугуна;
- существенным запаздыванием в получении информации о выходных показателях процесса (продуктах плавки), в связи с чем результаты непосредственного контроля часто не позволяют определять первопричину расстройств хода печи;
- глубокой взаимосвязью всех процессов плавки при ограниченности ресурсов на управление;
- наличием случайных измерительных помех различной природы и характера, что снижает качество информации.

Конечной целью разработок систем управления комплексом доменных печей является создание системы управления, обеспечивающей нормальную работу производства в целом при минимальной себестоимости продукции с учетом ограничений, обусловленных требованиями технологии и возможностями оборудования [16, 19, 20, 23, 26, 27]. В области управления доменным процессом сегодня необходимо на основе разработки средств получения объективной информации о параметрах технологического процесса и имеющихся возможностей использования средств интеллектуального обеспечения максимально приблизить управление доменным производством к автоматизированному [16, 19, 20].

Магнитогорский, Новолипецкий, Череповецкий, Западносибирский, Нижнетагильский и ряд других металлургических комбинатов России осуществляют оснащение доменных печей информационно-управляющими системами на базе микропроцессорной техники. В то же время, следует отметить, что некоторый перечень задач и функций верхних 3 и 4-го уровней реализован только на отдельных доменных

печах: ОАО «ММК», ОАО «НТМК», ОАО «Северсталь», ОАО «НЛМК», ОАО «Запсибметкомбинат», на доменной печи № 3 АК «Тулачермет» и некоторых других. Решений задач для верхнего 4-го уровня управления явно недостаточно [20].

Таким образом, несмотря на быстрое расширение применения в мировой практике доменного производства вычислительной техники, масштабы использования современных компьютерных систем управления на доменных печах России остаются крайне ограниченными. В настоящее время это связано, главным образом, не с экономической целесообразностью, а с общим недостатком капитальных вложений средств в реконструкцию и модернизацию действующих печей. Заметим, что недостаточное общее количество измеряемых параметров работы доменных печей, низкая точность традиционно существующих измерений, ограничения по мощности, быстродействию и надежности вычислительной техники, особенно отечественного производства, являлись главными причинами малой эффективности АСУ ТП доменных печей. По этой же причине большое количество научно-исследовательских работ, направленных на оптимизацию управления доменной плавкой с применением математического моделирования, не имело практической реализации и заканчивалось на этапе опытной эксплуатации или ограничивалось рекомендациями. В связи с этим, имеется существенный разрыв между математическими моделями, разрабатываемыми различными коллективами исследователей, и их реальным, практическим внедрением в АСУ ТП доменной плавки [1 4,16,18,19,20].

Поэтому следует отметить, что на сегодняшний день актуальной задачей является разработка математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области доменного производства именно для верхних SCADA и MES уровней. Математическому описанию (компьютерному моделированию) процессов отводится важнейшая роль в исследовании и оптимизации явлений газодинамики, движения шихты, теплообмена, массообмена, восстановления, размягчения, фильтрации и других процессов, происходящих в действующих металлургических агрегатах, в том числе при разработке новых схем переработки железорудного сырья.

Ранее, в бывшем СССР, в условиях централизованного планирования, создавались крупные обогатительные комбинаты для снабжения крупнейших металлургических предприятий с полным металлургическим циклом железорудным сырьем. При этом жестко регламентировались поставщики железорудного сырья, коксующихся углей доля данного металлургического предприятия. В этих условиях выбор рационального шлакового, дутьевого, газодинамического и теплового режимов доменной плавки

решались в основном путем проведения крупномасштабных опытных плавов при участии ряда ведущих научно-исследовательских и учебных институтов СССР.

В настоящее время традиционные связи металлургических предприятий России с поставщиками сырья строятся по-иному, многие из поставщиков сырья находятся за границей. Сегодня металлургические предприятия России работают при исключительной напряженности и нестабильности рынка железорудного сырья и коксующихся углей. В условиях рыночных отношений и жесткой конкуренции возрастает роль научно обоснованных решений, направленных на решения комплекса экономико-технологических задач по закупке сырья, определению оптимального состава доменных и агломерационных шихт, подбора рационального шлакового, дутьевого, газодинамического и теплового режимов доменной плавки исходя из складывающейся ситуации на рынке железорудного сырья, коксующихся углей. Это связано с тем, что экспериментальное изучение агрегатов сопряжено либо с большими финансовыми, технологическими и техническими трудностями, либо попросту невозможно.

В современных условиях решение этих задач прежними методами, т.е. путем организации очень длительных, дорогостоящих крупномасштабных опытных плавов, экспериментального изучения агрегатов сопряжено с большими финансовыми, технологическими и техническими трудностями, а при напряженности рынка железорудного сырья не только экономически нецелесообразно, но и просто невозможно. В связи этим основным методом решения подобных проблем является метод математического моделирования и создание соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения, предназначенного для MES-уровня информационно-моделирующей системы доменного производства.

Понятие компьютерных систем поддержки принятия решений. Системы поддержки принятия решений представляют собой вид компьютерных информационных систем, помогающих оператору (лицу, принимающему решение – ЛПР), в принятии решений при наличии плохо структурированных задач посредством прямого диалога с компьютером с использованием данных и математических моделей [19,20].

Задачи считаются хорошо *структурированными*, если лицу, принимающему решение, известны все их элементы и взаимосвязи между ними. Обычно при таком высоком уровне понимания задачи удастся выразить ее содержание в форме математических моделей, имеющих точный алгоритм решения. Эти задачи носят повторяющийся, рутинный характер. Целью использования информационных систем для решения структурированных задач является практически полная автоматизация их решения. Решение хорошо

структурированных задач по жестким, раз и навсегда созданным алгоритмам, производится компьютером и, в принципе, не требует участия технолога (ЛПР).

Задачи, по которым ЛПР не удастся выделить отдельные элементы и установить связи между ними, называются *неструктурированными*. Для решения неструктурированных проблем компьютер оказывается бесполезным, здесь основная работа остается за технологом (человеком). В практике управления технологическими процессами имеется сравнительно немного полностью структурированных или совершенно неструктурированных задач. О большинстве же задач можно сказать, что ЛПР имеет о них неполное представление, зная лишь часть их элементов и связей между ними. Такие задачи называются *плохо структурированными*. Именно такие задачи чаще всего и встречаются в металлургии при управлении технологическими процессами, качеством продукции и т.п. Решение плохо структурированных задач требует *использования компьютера совместно с усилиями человека* (производственного персонала, лица, принимающего решение). При этом информационные системы могут оказывать лицу, принимающему решение, три вида поддержки: *информационную, модельную и экспертную*.

Современные системы поддержки принятия решений (СППР), возникшие как естественное развитие и продолжение управленческих информационных систем (ИС) и систем управления базами данных (СУБД), представляют собой системы, максимально приспособленные к решению задач повседневной управленческой деятельности, являются инструментом, призванным оказать помощь пользователю – лицу, принимающему решения (ЛПР). С помощью СППР могут решаться неструктурированные и слабоструктурированные многокритериальные задачи.

СППР, как правило, являются результатом мультидисциплинарного исследования, включающего теории БД, искусственного интеллекта, интерактивных компьютерных систем, методов имитационного моделирования.

- Анализ литературных источников показал, что в настоящее время нет общепринятого определения СППР, поскольку конструкция СППР существенно зависит от вида задач, для решения которых она разрабатывается, от доступных данных, информации и знаний, а также от пользователей системы.

Можно привести, тем не менее, некоторые элементы и общепризнанные характеристики СППР. СППР – в большинстве случаев – это интерактивная автоматизированная система, которая помогает пользователю (ЛПР) использовать данные и модели для идентификации и решения задач и принятия решений. Система должна

обладать возможностью работать с интерактивными запросами с достаточно простым для изучения языком запросов.

Модельные системы поддержки принятия решений. В состав модельной системы поддержки принятия решений входят три основных компонента (в соответствии с рисунком 1.2) [16,20]:

- 1) база данных;
- 2) база моделей;
- 3) система управления интерфейсом между пользователем и компьютером.

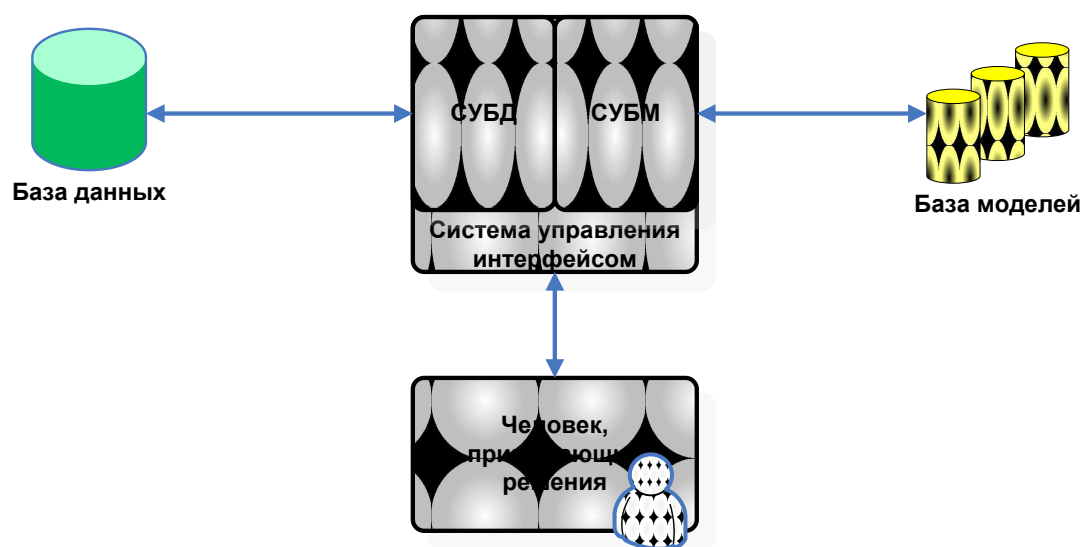


Рисунок 1.2 - Основные компоненты модельной системы поддержки принятия решения

База данных в модельной системе поддержки принятия решений играет важную роль, поскольку данные могут использоваться непосредственно пользователем для расчетов при помощи математических моделей.

База моделей (комплекс различных моделей) используется для описания и оптимизации процесса. Без моделей осуществлять процессы в информационных системах можно только методом проб и ошибок (дерганья металлургических систем), что, конечно же, неприемлемо в современной металлургии. Заметим, что комплекс математических моделей является основой модельной системы поддержки принятия решения. Пользователь имеет возможность получить недостающую ему информацию для принятия решения путем установления диалога с моделью, что облегчает выработку и оценку альтернатив решения.

Система управления интерфейсом определяет язык пользователя, язык сообщений компьютера, организующий диалог на экране дисплея. Язык пользователя – это те действия, которые пользователь производит в отношении системы путем использования возможностей клавиатуры, мыши и т.п. Язык сообщений – это то, что пользователь видит на экране дисплея, данные, полученные на принтере, звук и т.п. В процессе диалога пользователь должен реализовать свои знания. Сюда относится не только план действий, находящийся в голове у пользователя, но и инструкции, справочные данные, выдаваемые компьютером по команде о помощи. Инструкции и справочные данные, выдаваемые системой по просьбе пользователя, обычно не стандартны, а специализированы с точки зрения сложившейся ситуации.

Главным элементом в модельных системах поддержки принятия решений являются *комплексы математических моделей*. Опыт показывает, что только использование адекватных моделей разного класса (математических моделей технологических процессов, моделей знаний, моделей распознавания образов, моделей данных и т.п.) может обеспечить успешность и эффективность функционирования информационных систем.

Интеллектуальным ядром такой переработки информации являются математические модели технологических процессов.

Вид математической модели зависит как от природы реальной системы, так и от задач исследования, требуемой достоверности и точности решения задач. Поскольку математические модели представляют собой наиболее абстрактные, а, следовательно, и наиболее общие модели, они широко используются в технологических процессах. Основным подходом к математическому моделированию металлургических процессов является аналитический, при котором модель строится исходя из внутренней структуры явлений, протекающих в системе. В этом случае входные и выходные параметры модели связываются друг с другом на основании универсальных законов сохранения массы и энергии, других фундаментальных физических и физико-химических закономерностей [1,4,5,11,15,18,23,24-27].

Полученное математическое описание процесса имеет более высокую информативность, широкую область применения, универсальность. Зависимости, установленные в результате аналитического описания явлений доменной плавки, отражают общие закономерности процесса и вследствие этого обладают большими прогнозными возможностями.

В такой ситуации плодотворный научный подход состоит в том, чтобы учитывать лишь главные факторы, оказывающие основное, определяющее влияние на исследуемое

явление. Второстепенные факторы, оказывающие слабое, не существенное влияние, при этом отбрасываются. Это связано с тем, что попытка учесть все мыслимые факторы неизбежно приведет к невероятному усложнению исследования и, как правило, к невозможности получения каких-либо практических выводов.

1.1.2. Функциональная модель автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха

Функциональная модель информационной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха (АИС АППС ДЦ) разработана с учетом требований инженерно-технологического персонала.

Исходя из анализа требований и функциональных возможностей системы, ее структуру можно разделить на ряд основных подсистем (в соответствии с рисунком 1.3).

1. *Сбор, первичная обработка и хранение данных.* Основной функцией подсистемы является заполнение базы данных исходными данными, необходимыми для успешного функционирования АИС АППС ДЦ.

2. *Визуализация данных о работе доменных печей и цеха в целом.* Обеспечивает построение графических трендов по указанным параметрам в любой комбинации за выбранный временной период.

3. *Формирование технического отчета о работе доменных печей и цеха.* Подсистема предназначена для формирования технического отчета о работе печей и цеха в целом за заданные периоды работы печей и цеха.

4. *Сопоставительный анализ работы доменных печей и цеха.* Обеспечивает возможность сравнения работы цеха или печи по комплексу выбранных параметров за заданный временной период.

5. *Модельная поддержка принятия решений, прогнозирование технологических ситуаций и диагностика работы доменных печей.* В основу реализации подсистемы положены алгоритмы расчета с использованием математических моделей доменного процесса для выбранного пользователем периода работы отдельных печей или цеха в целом.

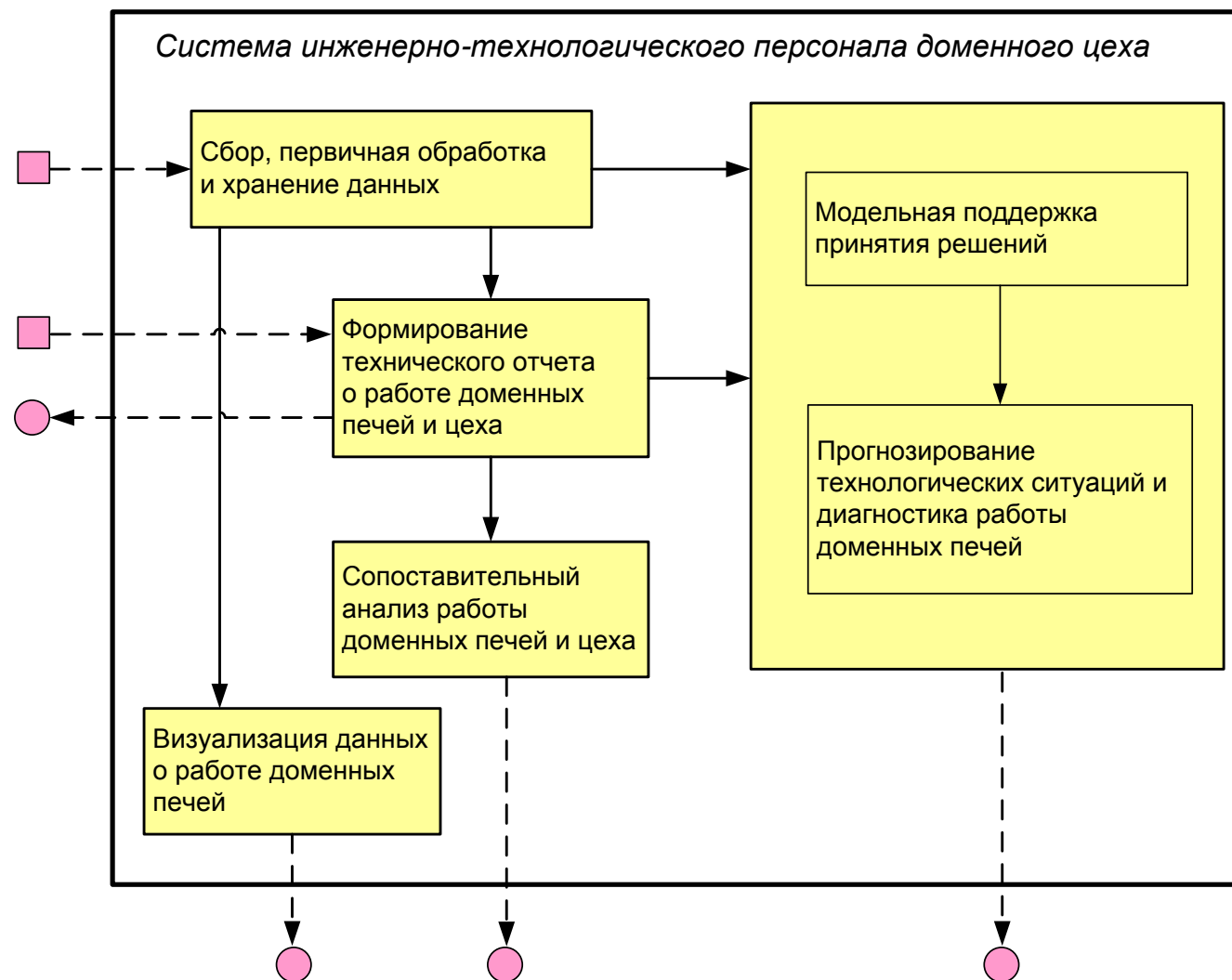


Рисунок 1.3 - Функциональная структура системы:



– источник данных;



– представление данных

Анализ доменного процесса позволяет констатировать, что подсистема модельной поддержки принятия решений анализа и прогноза работы доменного цеха должна включать следующие взаимосвязанные подсистемы более низкого уровня декомпозиции:

- расчета балансов элементов;
- шлакового режима;
- газодинамического режима;
- теплового режима;
- диагностики хода доменной плавки.

Указанные подсистемы охватывают основные явления, свойственные доменному процессу. Каждая из этих подсистемы взаимодействует с другими блоками, подсистемами и внешней средой.

Следующим этапом разработки после создания структуры АИС АППС ДЦ является процесс функционального моделирования системы.

В основу метода, используемого при проектировании автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха, положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0 [20]. Методология IDEF0 является развитием хорошо известного графического языка описания функциональных систем SADT (Structural Analysis and Design Technique), предложенную Дугласом Россом. Использование этой методики позволило смоделировать функциональную структуру программного комплекса, выявить производимые им действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции, что, в конечном итоге, позволило на ранней стадии проектирования предотвратить возможные ошибки.

Верхний (первый) уровень функциональной модели

АИС инженерно-технологического персонала доменного цеха

Внешний вид контекстной диаграммы функциональной модели АИС инженерно-технологического персонала доменного цеха представлен на рисунке 1.4.

На первом уровне функциональной модели выделены два основных потока входной информации в систему: данные из систем АСУ ТП и корпоративной информационной системы (КИС), а также отчетные документы по производству. Конкретизация входных данных представлена на последующих этапах декомпозиции системы.

Интерфейс управления можно разбить на четыре логических блока: совокупность документов (технологических инструкций, руководств пользователей); нормативно-справочной информации (НСИ); требований пользователей; описание математических моделей и алгоритмов, на основе которых проведена разработка программного

обеспечения по анализу и прогнозированию работы доменных печей и цеха. Заметим, что под документами понимается инструкции ведения технологических процессов, существующих на предприятии и утвержденных в качестве стандарта предприятия и руководства пользователей для работы с автоматизированными рабочими местами.

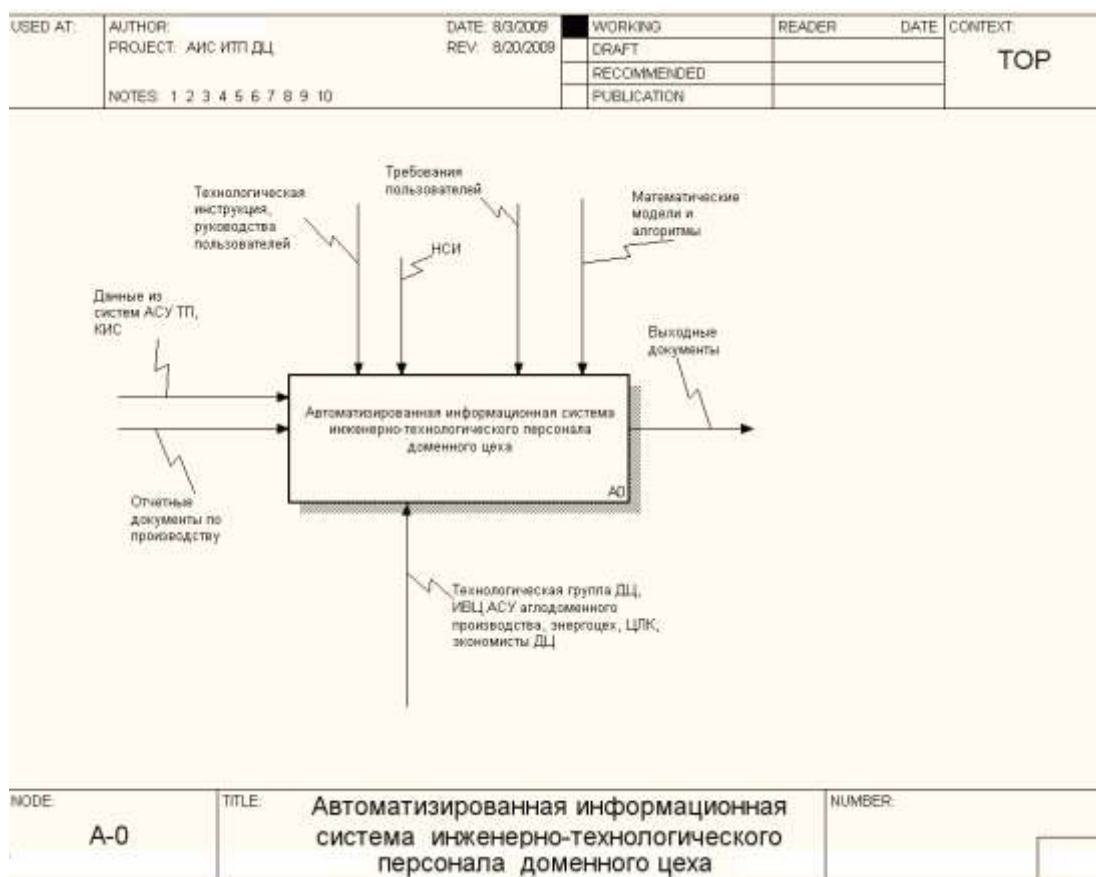


Рисунок 1.4 - Контекстная диаграмма функциональной модели АИС АППС ДЦ

Первый блок интерфейса однотипен практически для всех уровней декомпозиции, так как деятельность инженерно-технологического персонала цеха и подразделений, участвующих в работе автоматизированной информационной системы регламентируется указанными выше документами и нормативными актами. Поэтому он представлен на всех уровнях декомпозиции системы.

Механизмы, представленные на контекстной диаграмме функциональной модели и участвующие в реализации данной функции, представлены набором основных структурных подразделений и производств, которые являются поставщиками и потребителями той или иной части информации АИС АППС ДЦ: технологическая группа доменного цеха (ДЦ), информационно-вычислительный центр АСУ (ИБЦ АСУ)

аглодоменного производства, энергоцех, центральная лаборатория комбината (ЦЛК), экономисты доменного цеха.

В качестве выходной информации АИС АППС ДП понимается набор отчетных документов, характеризующих итоговые показатели работы доменных печей и цеха в целом за отчетный период, а также результаты прогнозной оценки работы печей с использованием модельных систем поддержки принятия решений. Первая часть документов имеет чисто статистический характер, вторая – результат расчета по математическим моделям доменного процесса, которая имеет своей целью провести анализ работы доменных печей и цеха в проектный период при изменении топливно-сырьевых условий их работы. В последнем случае с помощью АИС АППС ДП инженер-технолог может количественно оценить тепловое состояние доменных печей, спрогнозировать дутьевой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки.

Декомпозиция первого уровня функциональной модели

АИС инженерно-технологического персонала доменного цеха

АИС АППС ДЦ можно разбить на законченные, но информационно, с точки зрения использования данных для анализа, взаимосвязанные подсистемы. Диаграмма первого уровня декомпозиции модели представлена на рисунке 1.5.

Функция «Сбор и первичная обработка данных» (А1) обеспечивает автоматическое наполнение системы данными из АСУ ТП и КИС. Сбор первичных данных производится в строго регламентированные моменты времени, которое установлено согласно требованиям инженерно-технологического персонала доменного цеха. Функция А1 наиболее информативна с точки зрения как количества параметров, так и с точки зрения объемов информации. Набор подключаемых параметров по конкретной доменной печи определяется условиями технического задания, разрабатываемого при реконструкции или капитальном ремонте доменной печи. Среднее количество параметров, отслеживаемое в АСУ ТП на ОАО «ММК» на одной доменной печи, составляет около 500, число работающих доменных печей 8. В зависимости от характера измеряемого параметра и требований технологических алгоритмов по использованию данного параметра в расчетах периодичность опроса параметров составляет от 1 до нескольких секунд. Учитывая их оперативность и большие объемы, большая ответственность ложится на их первичную обработку и фильтрацию заведомо некорректных данных и их последующее хранение для использования в АИС АППС ДЦ.

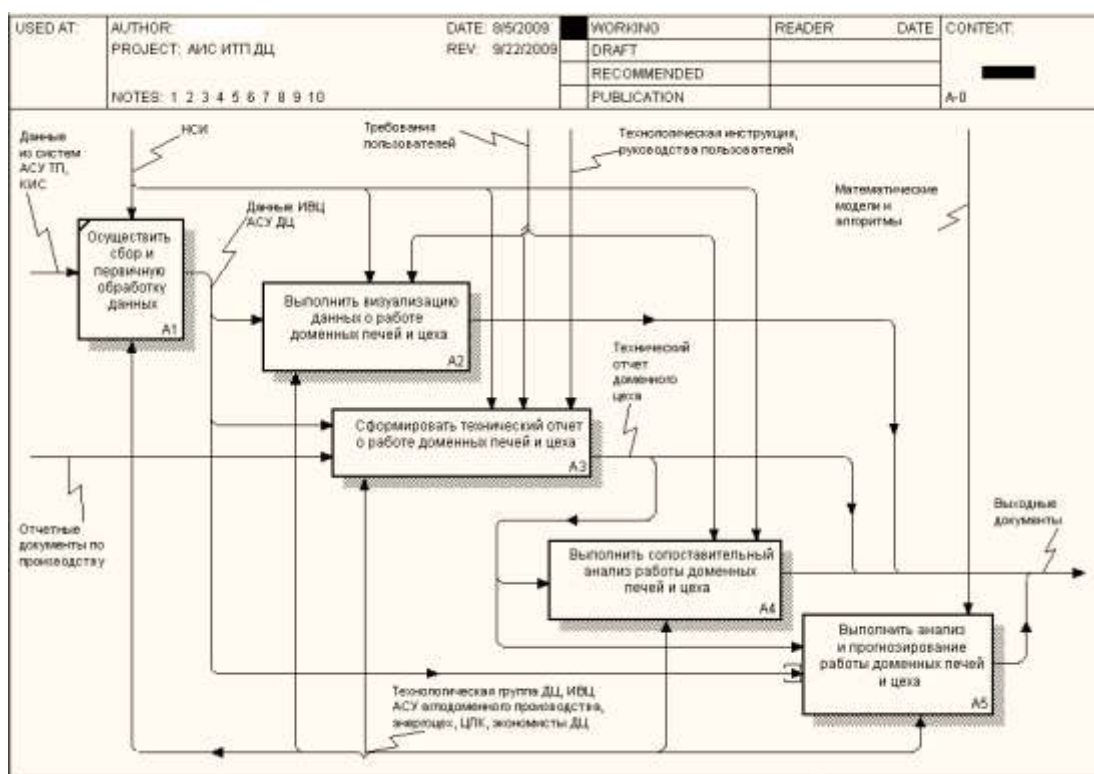


Рисунок 1.5 - Первый уровень декомпозиции функциональной модели АИС АППС ДЦ

В первичной обработке данных участвуют работники различных подразделений комбината (технологическая группа доменного цеха (ДЦ), информационно-вычислительный центр АСУ (ИВЦ АСУ) аглодоменного производства, энергоцех, центральная лаборатория комбината (ЦЛК), экономисты доменного цеха). Технологический персонал при выполнении этой функции руководствуется соответствующими технологическими инструкциями и руководствами пользователей существующих автоматизированных рабочих мест (АРМ) корпоративной сети комбината (АРМ мастера доменной печи, АРМ газовщика, АРМ весовщика и др.).

Выходная информация служит источником для всех других подсистем, в частности визуализации данных о работе доменных печей, сопоставительной оценки отчетных показателей, формирования технического отчета доменного цеха, проведения анализа и прогнозирования работы доменных печей и цеха в целом при возможных изменениях топливно-сырьевых условий их работы.

Функция «Визуализация данных» (А2) обеспечивает возможность построения графических трендов фактических и основных технико-экономических показателей работы доменных печей и цеха по среднесменным и суточным данным. Выбор показателей работы осуществляется на основе требований пользователей системы и блока нормативно-

справочной информации. Выполнение этой функции обеспечивают, главным образом, работники технологической группы доменного цеха.

Результатом выполнения функции является набор отчетных документов с результатами визуальной оценки, а также численные данные, используемые для построения гистограмм, которые можно использовать для более детального анализа технологических режимов доменной плавки.

Функция *«Технический отчет» (A3)* обеспечивает подготовку и формирование всех сведений о работе доменного цеха за календарный месяц или за период с начала года до указанного месяца. Выполнение этой функции обеспечивается сотрудниками технологической группы доменного цеха, ИВЦ АСУ аглодоменного производства, энергоцеха, ЦЛК, экономистами доменного цеха. Руководящими документами для этой подсистемы являются технологическая инструкция доменного цеха, руководства пользователей автоматизированных рабочих мест, нормативно-справочная информация корпоративной сети комбината и требования пользователей к обработке данных.

Выходом подсистемы являются отчетные документы по основным разделам доменного производства.

Функция *«Сопоставительный анализ» (A4)* обеспечивает возможность сравнения отчетных показателей работы доменных печей за месяц или за период с начала календарного года до указанного месяца. Источником данных этой функции являются сведения о работе доменных печей, которые были подготовлены подсистемой *«Технический отчет»* и утверждены официально руководством доменного цеха.

Функция *«Анализ и прогнозирование» (A5)* позволяет проводить оценку и прогнозирование работы доменных печей и цеха в условиях, когда планируются изменения топливно-сырьевых условий их работы. Входные данные в эту подсистему поступают из подсистем *A1* и *A3*. Обработку данных производят с помощью специального программного модуля, основу которого составляют математические модели газодинамического и шлакового режимов доменной плавки.

Данная подсистема выполняет одну из наиболее важных с информационной точки зрения задач – предоставляет технологическому персоналу данные для проведения анализа работы доменных печей и цеха в целом и осуществление прогнозирования возможных событий, связанных с изменением критичных для технологического процесса входных параметров. Результаты прогнозной оценки фиксируются в виде специальных табличных и графических форм, экспортированных в популярные форматы отчетных документов.

Основываясь на результатах анализа информации, собранной при реализации предыдущих функций, по определенным алгоритмам производится анализ работы

доменных печей и цеха в целом, оценивается текущее состояния хода доменного процесса, производится анализ наметившихся отклонений ключевых показателей, выявляются причины, повлекшие эти отклонения, осуществляется прогнозирование.

Полученная информация используется инженерно-технологическим персоналом для решения ряда технологических задач, разработки мероприятий по повышению эффективности работы доменных печей и цеха, а также принятия обоснованных управленческих решений по их внедрению в практику доменного производства.

Проиллюстрируем методологию дальнейшей декомпозиции только на рассмотрении функций *A2*, *A3*, *A4* и *A5*, вклад которых, с точки зрения информации, наиболее существенен для успешного функционирования. При этом ограничимся только третьим уровнем декомпозиции системы.

Декомпозиция функции A2 «Выполнить визуализацию данных о работе доменных печей и цеха»

Функция *A2* системы декомпозируется на три составляющие, которые моделируют действия пользователя при работе с АИС АППС ДП (в соответствии с рисунком 1.6).

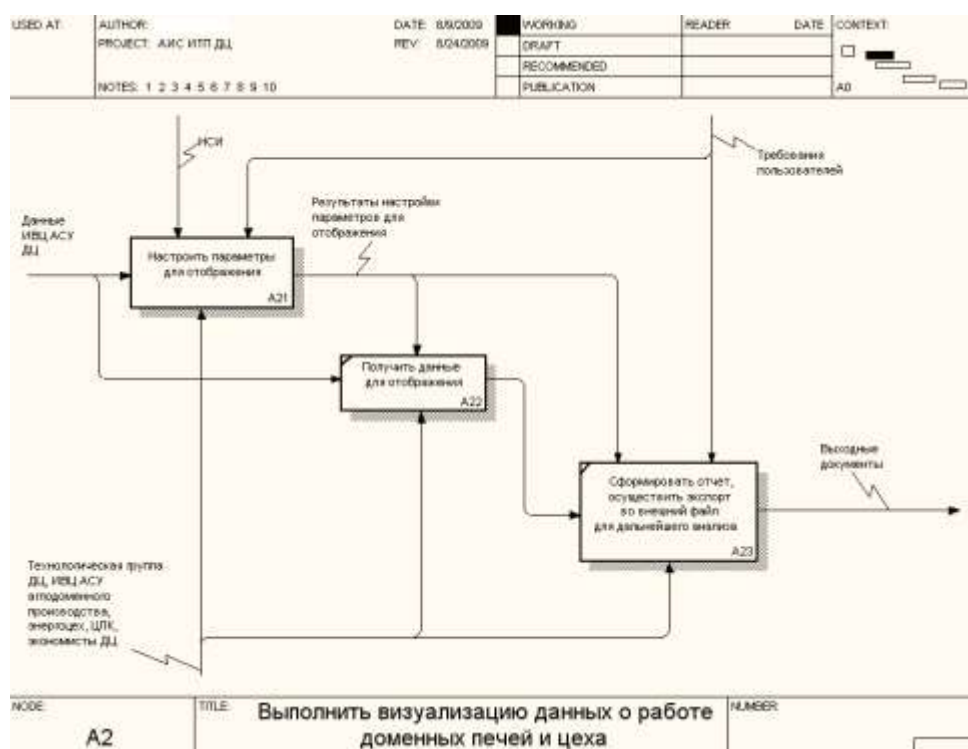


Рисунок 1.6 - Декомпозиция функции A2 «Выполнить визуализацию данных о работе доменных печей и цеха»

В качестве входной информации функций *A21* и *A22* используются данные ИВЦ АСУ ДЦ, которые извлекаются путем обращения к таблицам сервера базы данных. Выполнение

функции *A23* производится на основе результатов функций *A21* и *A22*. В результате выполнения функции *A2* инженерно-технологический персонал имеет числовую и графическую информацию по следующим разделам доменного производства:

Согласно требованиям пользователей реализация функции *A2* должна предусматривать возможность отображения показателей работы доменных печей в двух режимах: «одна печь – несколько параметров» и «один параметр – несколько печей». В первом режиме отображения после выбора пользователем конкретной доменной печи необходимо предоставить ему возможность множественного выбора показателей для построения графических трендов. Таким образом, пользователю обеспечена возможность оперативно установить тенденцию распределения нескольких произвольно выбранных показателей на конкретной доменной печи с целью вскрыть закономерности и причины их изменения.

Во втором режиме пользователь сначала должен выбрать конкретный параметр, доступный для отображения, и затем указать одну или несколько доменных печей, в которых он желает увидеть динамику изменения этого показателя. В этом случае пользователь сможет выполнить визуальную сравнительную оценку распределения конкретного показателя и выявить причины отклонения его величины на различных доменных печах.

Показатели, которые доступны для выбора в ходе выполнения функции настройки *A21*, условно можно подразделить на две категории – фактические и расчетные. Величины фактических показателей извлекаются путем прямого обращения к таблицам сервера базы данных, которые, в свою очередь, наполняются из систем АСУ ТП и с помощью автоматизированных рабочих мест производственного персонала различных служб аглодоменного цеха. Расчетные показатели определяются по специальным математическим алгоритмам путем обработки фактических показателей. Использование расчетных показателей позволяет технологическому персоналу провести более глубокий анализ закономерностей и явлений доменной плавки.

Еще одним результатом подсистемы настройки параметров *A21* является установка периода усреднения показателей для отображения на трендах. Согласно требованиям специалистов технологической группы в качестве периода усреднения показателей достаточно выбирать смену или сутки.

*Декомпозиция функции АЗ «Сформировать технический отчет
о работе доменных печей и цеха»*

Данная функция является одной из основных, так как именно здесь создается отчетная информация, касающаяся всех аспектов производства доменных печей и цеха в целом за календарный месяц. Подсистема АЗ, в соответствии с рисунком 1.7, декомпозирована на следующие подсистемы:

- учет поступления и расходов шихтовых материалов и кокса (АЗ1);
- учет выплавленного чугуна и выхода шлака (АЗ2);
- ввод данных по химическому составу и показателям качества сырья, топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и продуктов плавки (АЗ3);
- учет простоев печей и состояния оборудования (АЗ4);
- ввод показателей работы воздухонагревателей (АЗ5);
- ввод данных из систем АСУ ТП и КИС (АЗ6);
- данные по использованию ковшей в доменном цехе (АЗ7);
- учет производственных кадров (АЗ8);
- проверить и подписать технический отчет (АЗ9).

В качестве входной информации использованы отчетные документы по производству (справки, отчеты, распоряжения и пр.) и данные ИВЦ АСУ доменного цеха. Реализацию подсистем осуществляют работники технологической группы ДЦ, ИВЦ АСУ аглодоменного производства, энергоцеха, ЦЛК и экономисты ДЦ на основании технологической инструкции, НСИ и требований к обработке данных. Выходная информация функций АЗ1 – АЗ8 является входной для подсистемы АЗ9.

Функция АЗ1 производит учет поступления, расхода и остатка на конец месяца каждого вида шихтового материала, расхода скипового кокса (влажного и сухого), расхода сухой коксовой мелочи, расхода сухого металлургического кокса.

Функция АЗ2 формирует сведения по: графику выпусков чугуна и шлака (количество плановых и фактических выпусков, процент выполнения графика выпусков); плановым и производственным показателям выплавки передельного и литейного чугунов, выходу шлака (план производства чугуна, план с учетом простоев, налив и слив передельного чистого (без шлака) и «грязного» (вместе со шлаком) чугуна, выплавленный чугун с кислородом, природным газом, количество шлака, процент выполнения производства по чугуну); производству передельного и литейного чугуна в чушках; потерях чугуна и шлака; потребителях чугуна (количество ковшей, миксеров и средний налив чугуна для каждого потребителя); использованию шлака по доменному цеху.

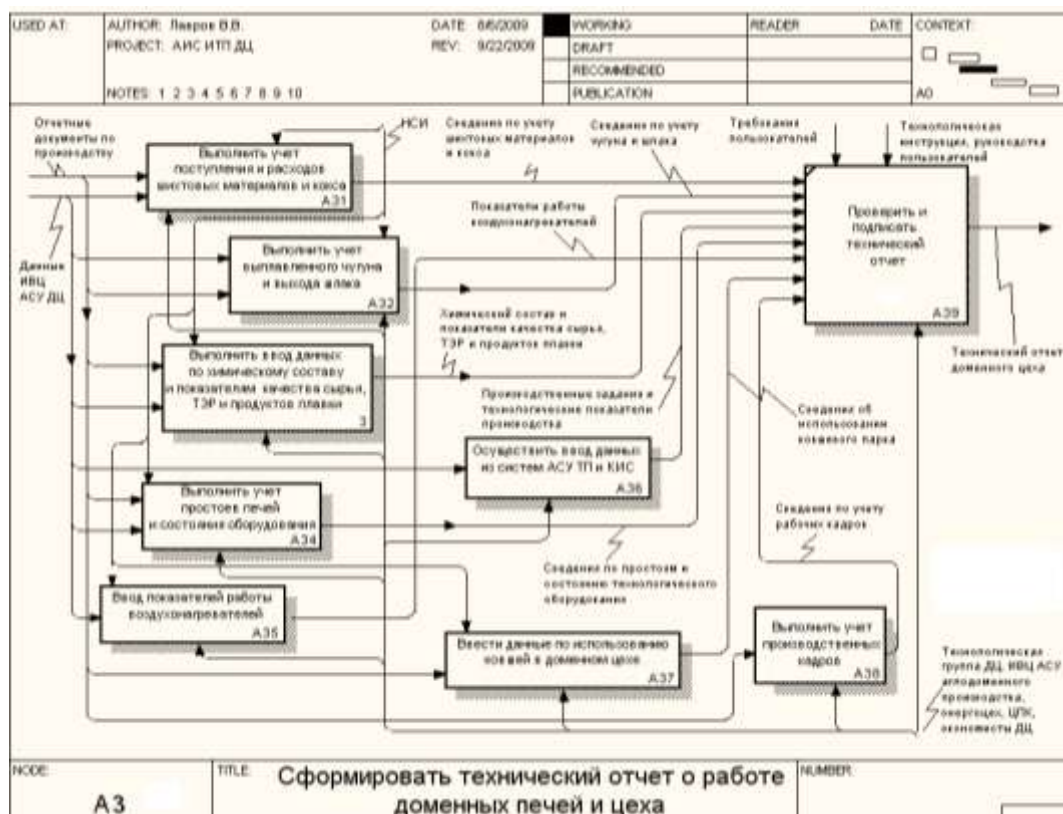


Рисунок 1.7 - Декомпозиция функции А3 «Сформировать технический отчет о работе доменных печей и цеха»

Функция А33 позволяет получить сведения по: химическому составу компонентов доменной шихты, золы кокса, природного газа, выплавленного чугуна и полученного шлака; показателям качества кокса (М10, М25, М40, влажности, содержанию золы, летучих, серы, углерода, фракционному составу, реакционной способности кокса (CRI), горячей прочности (CSR)) и чугуна (процент выплавленного чугуна с содержанием серы более 0,020 и 0,022 %).

Функция А34 производит формирование сведений по простоям и состоянию технологического оборудования. Сведения о простоях доменных печей поступают автоматически из АСУ ТП и включают в себя учет типа, категории и вида каждого простоя, реального времени его начала и окончания, продолжительности простоя. Оценка состояния технологического оборудования включает в себя выбор типа оборудования из блока НСИ и указание варианта его состояния (неудовлетворительное, удовлетворительное, хорошее).

Функция А35 позволяет зафиксировать характеристики работы работы воздухонагревателей доменных печей, в частности температуру купола, температуру дымовых газов и продолжительность цикла, в том числе воздушного периода.

Функция *A36* реализует ввод данных из систем АСУ ТП и КИС. Сведения, поступающие из АСУ ТП, включают в себя данные по влажности кокса, параметрам воздушного дутья и колошникового газа, температуре чугуна, использованию энергоресурсов в доменных печах и цехе. Из КИС поступают данные по расходам сырья, кокса, энергоресурсов для каждого производственного задания.

Функция *A37* позволяет отследить работу ковшевого парка доменного цеха. Сведения, формируемые функцией *A37*, включают в себя данные о наличии ковшей, количестве ковшей в работе, ремонте, резерве, отремонтированных, службе ковшей наливов и количестве сменных шлаковых чаш.

Функция *A38* учета рабочих кадров формирует сведения о количестве людей по плану, фактическому среднесписочному составу, количестве рабочих на конец месяца, величине отработанных человеко-часов.

Окончательная реализация данного этапа декомпозиции системы зависит от реализации функции проверки и подписания технического отчета (функция *A39*). Функция *A39* осуществляет предварительное отображение следующих разделов технического отчета доменного цеха.

После предварительного просмотра отчета функция *A39* позволяет выполнить его подписание. Подписание отчета делает недоступным любые изменения данных в отчетном месяце. С помощью этой функции пользователь может скорректировать фамилии и должности сотрудников, которые несут ответственность за содержание технического отчета. Выполнение этой функции, согласно технологической инструкции доменного цеха, возложено на пользователя из состава технологической группы, наделенного соответствующими полномочиями. При необходимости возможно отложить подписание отчета, в этом случае станет возможным редактирование данных в текущем месяце.

*Декомпозиция функции A4 «Выполнить сопоставительный анализ
работы доменных печей и цеха»*

Функция *A4* тесно интегрирована с функцией подготовки технического отчета доменного цеха *A3*, поскольку в качестве входной информации использует данные, реализованные функцией *A3*. В результате работы функции *A4* инженерно-технологический персонал обеспечивается достоверной информацией для осуществления функций контроля и сравнительного анализа за работой доменных печей и цеха в целом в различные временные периоды, а также данными для использования в компьютерных системах поддержки принятия решений.

Подсистема *A4* декомпозируется на четыре составляющие, которые моделируют действия пользователя при работе с АИС АППС ДЦ, в соответствии с рисунком 1.8.

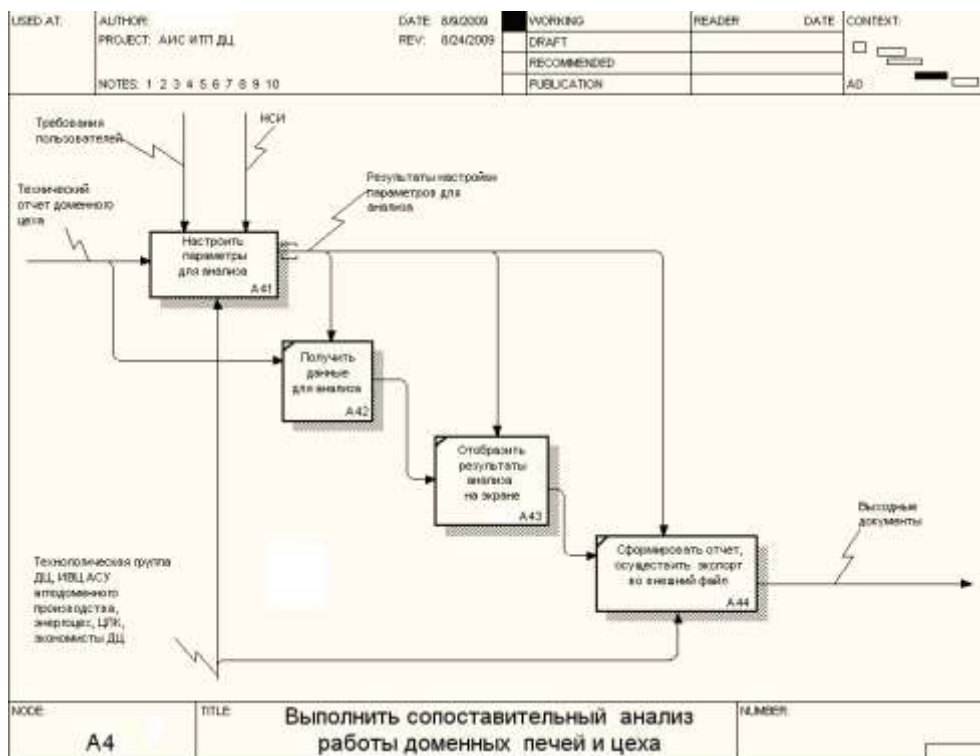


Рисунок 1.8 - Декомпозиция функции А4 «Выполнить сопоставительный анализ работы доменных печей и цеха»

Реализация функции *A41* производится в автоматизированном режиме, в ходе которого пользователь выбирает отчетный и сравнительный период работы доменного цеха, режим сравнения (календарный месяц или с начала года до указанного месяца), отчетный показатель из списка соответствующего раздела технического отчета или блока отчетных показателей. Согласно требованиям специалистов инженерно-технологической для проведения более детального сопоставительного анализа информации и оперативного выявления причин отклонения плановых показателей от фактически полученных в отчетном периоде сформированы блоки показателей, в которые входят сведения по оценке комплекса показателей.

Реализация функции получения данных *A42* производится на основании результатов выполнения функции *A41* в автоматическом режиме. Полученные данные отображаются с помощью подсистемы *A43* на экране и служат источником входной информации для формирования функцией *A44* отчета с возможностью его немедленной распечатки или экспорта во внешний файл офисного документа.

Декомпозиция функции А5 «Выполнить анализ и прогнозирование работы доменных печей и цеха»

Реализация функции А5 производится на основании комплекса математических моделей и алгоритмов, которые позволяют производить анализ шлакового, газодинамического и теплового режимов доменной плавки и прогнозировать работу доменных печей при изменении топливно-сырьевых условий, в соответствии с рисунком 1.9.

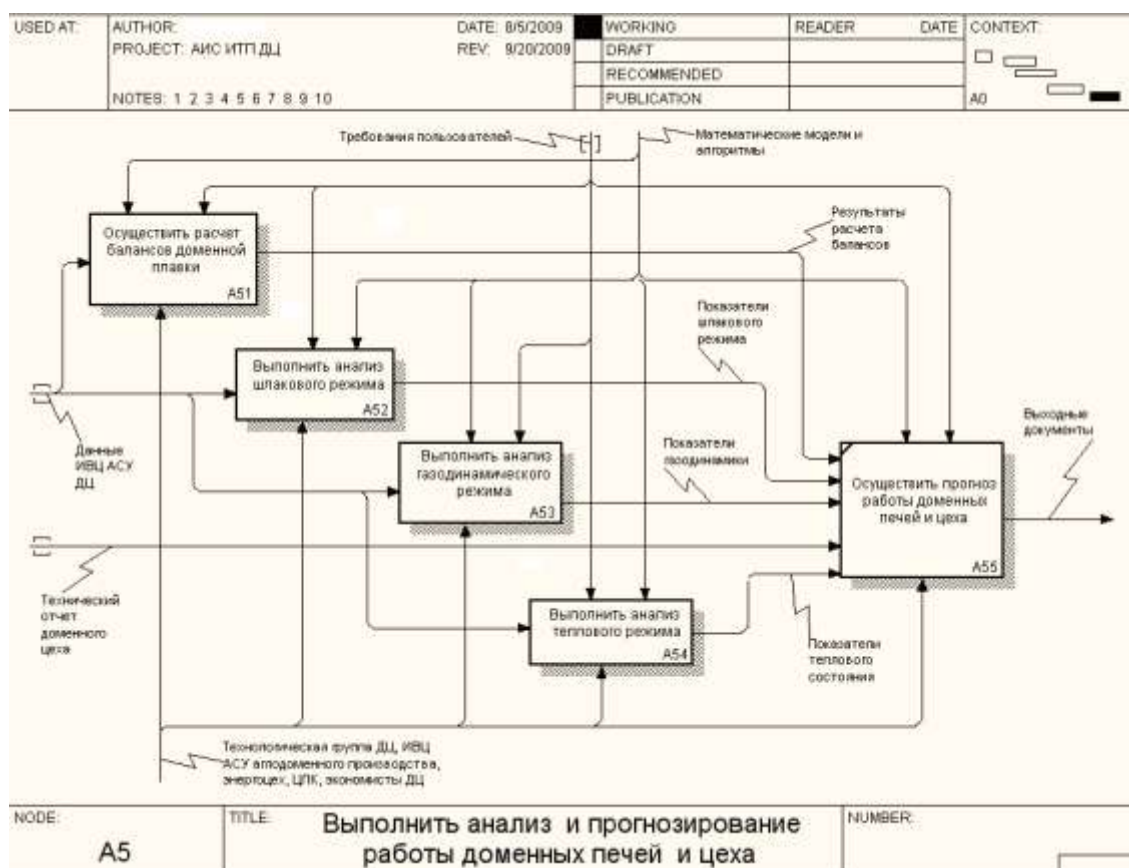


Рисунок 1.9 - Декомпозиция функции А5 «Выполнить анализ и прогнозирование работы доменных печей и цеха»

В качестве входной информации в подсистеме А5 используются фактические данные о работе доменных печей, поступающие из подсистем А1–А4. В результате реализации данной функции инженерно-технологический персонал качественно и количественно оценивает возможности использования различных видов сырья и топлива с учетом заданных требований по производству чугуна, составу жидких продуктов плавки, шлаковому, газодинамическому и тепловому режимов в доменной плавке.

В результате на основе системного подхода разработана функциональная модель автоматизированной информационной системы инженерно-технологического персонала доменного цеха, определены основные функции и взаимосвязи между отдельными функциональными блоками. Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели АИС АППС ДЦ составляет 136.

Результаты функционального моделирования позволили перейти к следующему этапу разработки системы – структурному моделированию отдельных подсистем.

1.1.3. Разработка структуры подсистемы сбора, первичной обработки и хранения данных

На рисунке 1.10 продемонстрирована структура подсистемы, в которой выделены основные компоненты для ее программной реализации.

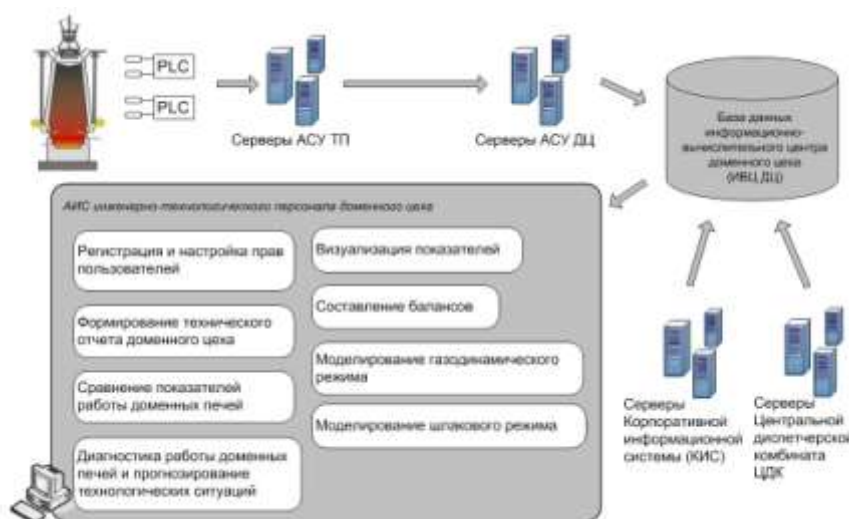


Рисунок 1.10 - Структурная схема подсистемы сбора, первичной обработки и хранения данных АИС АППС ДЦ

Центральным звеном АИС АППС ДЦ является структура хранения данных, которая формируется на сервере базы данных информационно-вычислительного центра аглодоменного производства (ИВЦ ДЦ). Источниками ее наполнения являются аппаратно-программное обеспечение АСУ доменного цеха, корпоративной информационной системы (КИС) и центральной диспетчерской комбината (ЦДК). В зависимости от требований отдельных подсистем возможно реализовать различные периоды усреднения данных в базе с помощью механизмов СУБД. Например, для подсистемы визуализации показателей минимальным периодом усреднения показателей работы является среднесменная величина, а для подсистемы формирования технического отчета необходимо представление данных за календарный месяц или за период с начала года до произвольно выбранного месяца.

Представленная на рисунке 1.10 структурная схема обеспечивает заданную функциональность, выполнение требований предметной области, относительно простое расширение и изменение системы, возможность автономной реализации отдельных программных модулей и их независимость от структуры хранения данных.

Требования к структуре БД. Схема базы данных должна удовлетворять следующим требованиям:

- абстрактность содержащихся данных, т.е. при добавлении новых параметров структура базы данных не должна измениться;
- схема БД должна быть приведена к третьей нормальной форме, т.е. не содержать избыточных данных и иметь четко определённые связи между отношениями;
- содержать ограничения на ввод и корректировку логически неверных значений;
- иметь связи между отношениями, которые отражают предметную область.

Необходимо отметить, что хотя нормализованная по всем правилам база данных обеспечивает высокую производительность и гибкость для оперативных транзакционных баз данных, существует ряд ситуаций, в которых может возникнуть необходимость в денормализации сущностей/таблиц по соображениям производительности.

В базе данных должна быть предусмотрена возможность отслеживания всех изменений данных в рабочих таблицах. Заполнение сведений о пользователях и компьютерах, с которых производится работа с системой, должно осуществляться через справочники.

Структура базы данных подсистемы сбора, первичной обработки и хранения данных. Анализ требований к функциональности разрабатываемой системы и существующего на комбинате информационного обеспечения корпоративной базы данных позволил сформировать структурную схему подсистемы АИС АППС ДЦ, отражающую возможности проведения сбора, первичной обработки и хранения данных для каждой отдельной подсистемы. В ходе этого процесса выделены относительно независимые информационные блоки, моделирующие отдельные аспекты доменного производства (в соответствии с рисунком 1.11). Выделенные блоки позволяют использовать хранящиеся в них данные одновременно в разных подсистемах. Центральным звеном является структура базы данных, которая располагается на сервере ИВЦ ДЦ в корпоративной сети комбината.

Этапы разработки внешних моделей базы данных будут рассмотрены далее при описании процессов проектирования и реализации отдельных подсистем АИС АППС ДЦ.

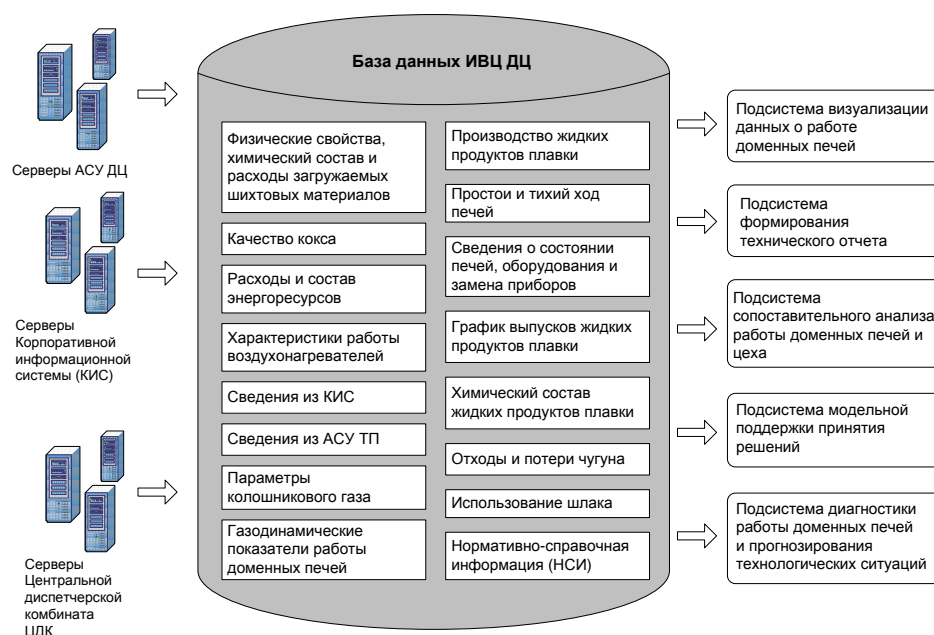


Рисунок 1.11 - Обобщенная структура базы данных АИС АППС ДЦ

1.1.4. Разработка структуры подсистемы визуализации данных о работе доменной печи

Подсистема визуализации данных предназначена для построения графических трендов фактических и расчетных показателей работы доменных печей и цеха по среднесменным и суточным данным. Выбор показателей работы осуществляется на основе требований пользователей подсистемы с помощью блока нормативно-справочной информации. Результатом выполнения функции является набор отчетных документов с результатами визуальной оценки, а также численные данные, используемые для построения гистограмм, которые можно использовать для более детального анализа технологических режимов доменной плавки.

Структура подсистемы визуализации представлена на рисунке 1.12.

Основными компонентами подсистемы являются источник данных и модуль визуализации данных. В качестве источника данных выступает централизованная база данных аглодоменного производства, работающая в режиме реального времени в корпоративной сети комбината. В процессе функционирования подсистемы производится регулярное автоматическое наполнение этой базы из серверов АСУ ТП показателями работы всех доменных печей, усредненными по сменам и за сутки. Модуль визуализации подсистемы обеспечивает по запросу пользователя отображение на форме или экспорт в виде отчетных файлов сведений о динамике изменения одного или нескольких показателей в течение любого временного периода. Выбор показателя производится из списка, который

загружается из блока НСИ базы данных аглодоменного цеха и сохраняется локально на рабочем компьютере пользователя в виде файла конфигурационных параметров.

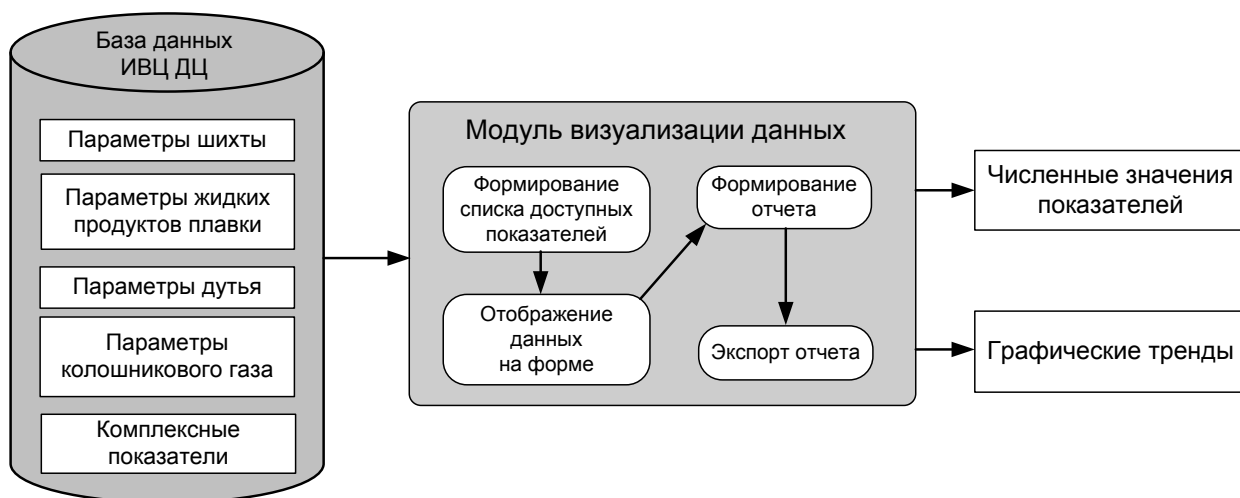


Рисунок 1.12 - Структура подсистемы визуализации данных

Показатели работы доменных печей при отображении в подсистеме сгруппированы на следующие категории:

- параметры шихты;
- жидкие продукты плавки;
- параметры дутья;
- параметры колошникового газа;
- комплексные показатели.

В каждой категории выделены фактические и расчетные показатели. Процедура визуализации позволяет отобразить данные за выбранный пользователем период в двух режимах: изменения данных по всем доступным показателям для отдельной доменной печи; изменения по одному выбранному показателю для всех доменных печей.

Процедура формирования отчетов формирует показатели работы доменного цеха в виде, пригодном для их обработки, распечатки и сохранения во внешнем файле (формат MS Office Excel) для последующего расчетного анализа.

1.1.5. Разработка структуры подсистемы формирования технического отчета о работе доменных печей и цеха

Подсистема формирования технического отчета является одной из основных, поскольку именно здесь создается фактическая отчетная информация, касающаяся всех аспектов производства доменных печей и цеха в целом за календарный месяц. Структура подсистемы представлена на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 - Структура подсистемы формирования технического отчета

Основными компонентами подсистемы являются база данных ИВЦ ДЦ и модуль формирования технического отчета.

Программный модуль подсистемы позволяет уполномоченным пользователям извлекать, корректировать и сохранять в централизованной базе данных сведения по всем аспектам производственной деятельности доменного цеха в отчетном периоде. Структура этой базы данных была рассмотрена ранее и представлена на рисунке 1.11. Процесс проектирования и программной реализации базы данных будет рассмотрен в следующих разделах. Наполнение базы данных осуществляется подсистемой сбора, первичной обработки и хранения данных АИС АППС ДЦ в автоматизированном режиме с помощью планировщика задач.

Структурные компоненты модуля, представленные на рисунке 1.13, позволяют отображать нормативные разделы технического отчета и формировать готовый документ на утверждение и подписание. После утверждения отчета указанные данные становятся недоступными для корректировки, в дальнейшем они используются остальными подсистемами АИС АППС ДЦ для проведения анализа работы и прогнозирования производственных ситуаций в доменном цехе.

1.1.6. Разработка структуры подсистемы сопоставительного анализа работы доменных печей и цеха

Создание подсистемы «Сопоставительный анализ работы доменных печей» направлено на реализацию в АИС АППС ДЦ инструмента, с помощью которого специалисты технологического отдела доменного цеха могут оперативно получать достоверную информацию для осуществления функций контроля и сравнения отчетных показателей работой доменных печей и цеха в целом в различные временные периоды.

Структура подсистемы сопоставительного анализа работы доменных печей и цеха представлена на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 - Структура подсистемы «Сопоставительный анализ» АИС АППС ДЦ

Информационной основой данной подсистемы является описанная ранее подсистема «Технический отчет доменного цеха», с помощью которой производится наполнение базы данных ИВЦ ДЦ фактическими показателями работы. Реализация функций подсистемы «Сопоставительный анализ работы доменных печей и цеха» производится в автоматизированном режиме, в ходе которого пользователь выбирает отчетный и сравнительный период работы доменного цеха, режим сравнения (календарный месяц или с начала года до указанного месяца), отчетный показатель из списка соответствующего раздела технического отчета или блока отчетных показателей. Основной функцией подсистемы является предоставление пользователям в наглядном структурированном виде информации по всем основным отчетным показателям. Полнота и наглядность в предоставлении информации позволяют своевременно принимать решения об изменении параметров технологических процессов для повышения качества продукции и экономии кокса. Кроме того, данная подсистема способствует быстрой обработке, сравнительной оценке данных и предоставляет широкие возможности в выборе и генерации отчетов.

Согласно требованиям специалистов инженерно-технологической группы для проведения сопоставительного анализа информации и оперативного выявления причин отклонения плановых показателей от фактически полученных в отчетном периоде сформированы следующие блоки показателей, отраженные на структурной схеме в модуле сопоставительного анализа работы доменных печей и цеха (в соответствии с рисунком 1.14).

Каждый из представленных на рисунке 1.14 информационных блоков содержит набор показателей, которые должны быть автоматически извлечены из базы данных доменного цеха и отображены на пользовательской форме. Большинство показателей являются отчетными и генерируются в базе данных в регламентируемые моменты времени (в начале месяца) с помощью, как уже было отмечено, подсистемы «Технический отчет доменного цеха». Другая категория показателей является производной и должна быть рассчитана на основе отчетных показателей.

1.1.7. Разработка структуры подсистем модельной поддержки принятия решений, диагностики работы доменных печей и прогнозирования технологических ситуаций

Подсистем модельной поддержки принятия решений, диагностики работы доменных печей и прогнозирования технологических ситуаций включает в себя блоки:

- расчета балансов (материального, теплового, отдельных элементов);

- диагностики теплового, шлакового и газодинамического режимов работы доменных печей и прогнозирования технологических ситуаций.

Подсистема расчета балансов доменной плавки включает в себя:

- материальный баланс;
- тепловой баланс;
- баланс отдельных элементов (*Fe, S, Zn, Cr, V, Ti, CaO* и щелочей).

Следует отметить, что математическое и алгоритмическое обеспечение модулей расчета материального и теплового балансов доменной плавки разработаны в УГТУ-УПИ ранее [16,19].

Структура подсистемы расчета балансов отдельных элементов условно отображена на рисунке 1.15. Данная подсистема позволяет определить удельные массы прихода и расхода *Fe, S, Zn, Cr, V, Ti, CaO* и щелочей. Входными данными для подсистемы являются дутьевые параметры, физические свойства, химический состав и расходы загружаемых шихтовых материалов и параметры жидких продуктов плавки.

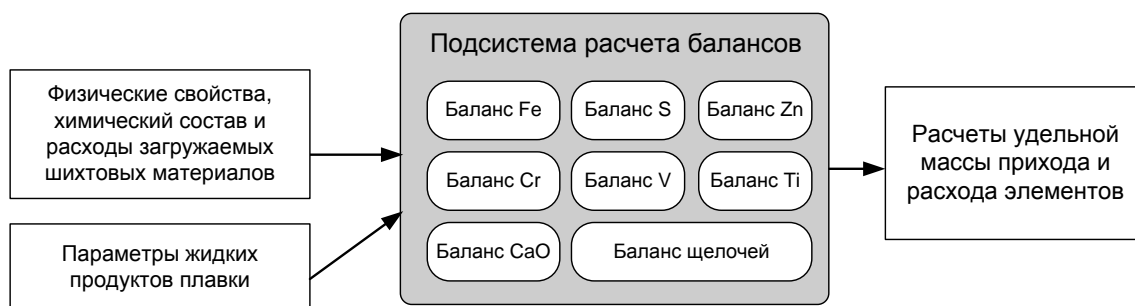


Рисунок 1.15 - Структура подсистемы расчета балансов доменной плавки

Основной принцип, положенный в основу *подсистемы диагностики теплового, шлакового и газодинамического режимов работы доменных печей и прогнозирования технологических ситуаций*, принцип - натурно-математического моделирования [9,16,19]. Развернутая структура модели, основанная на принципе натурно-модельного подхода, представлена на рисунке 1.16. Модель условно можно разделить на две части - модель базового состояния и прогнозирующую модель.

Модель базового (эталонного) состояния позволяет оценивать состояние процесса по фактическим усредненным показателям за базовый (эталонный) период работы печи. Базовый период (аналог-стандарт) – служит базой сравнения при анализе и обобщении фактических показателей работы отдельных доменных печей и заводов.

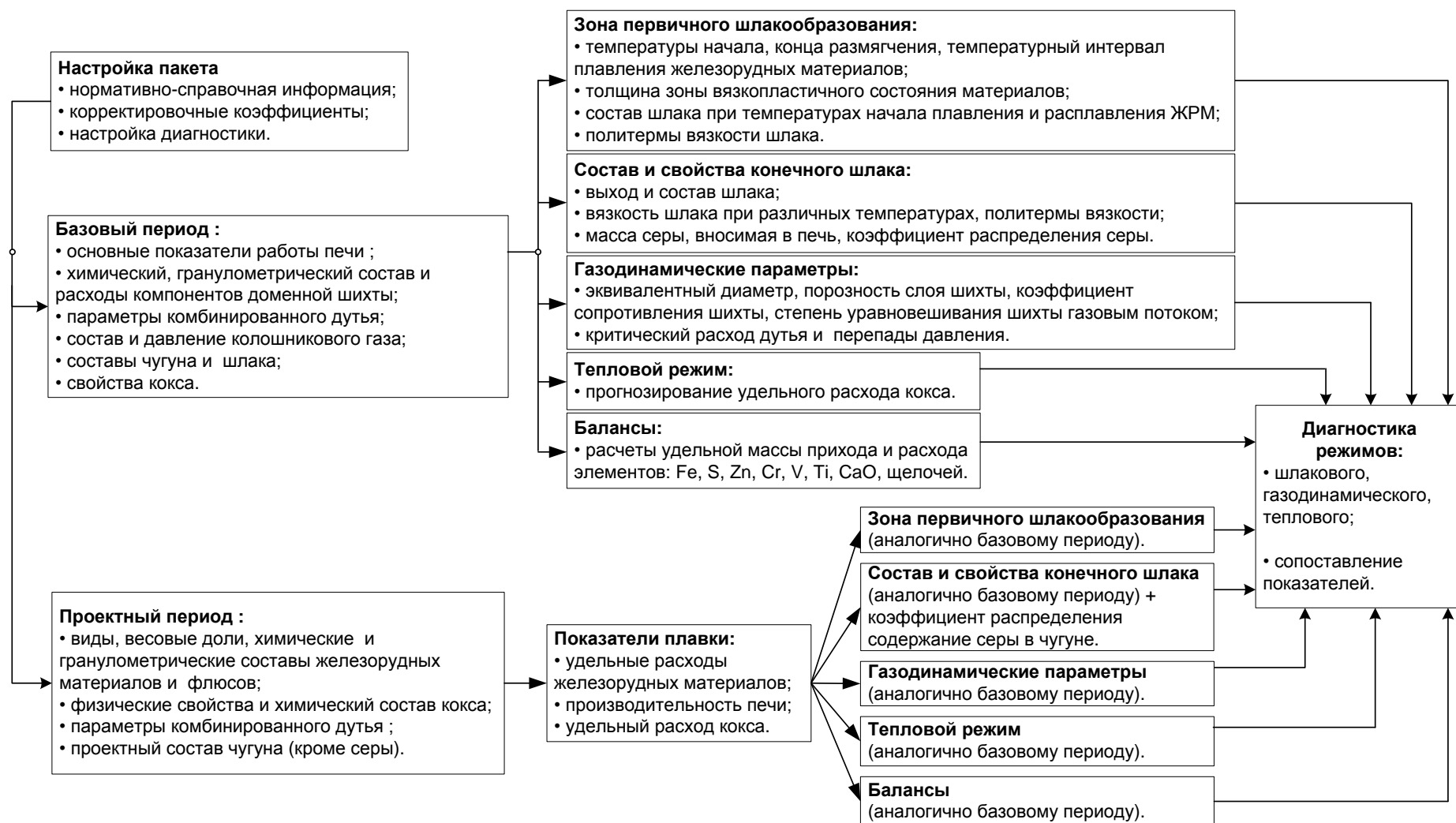


Рисунок 1.16. Структура подсистемы моделирования доменной плавки

Информация о базовом периоде необходима для адаптации математической модели к реальным условиям работы печи и настройки модели. При этом используется фактически доступная информация о работе печи: параметрах шихты, комбинированного дутья, колошниковога газа и продуктов плавки и др. Прогнозирующая же модель с использованием результатов, полученных с помощью модели базового (эталонного) состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров.

Таким образом, проектный период – период работы печи при планируемых при изменении состав и свойств шихтовых материалов, но не реализованных условиях. Для решения задач выбора оптимального состава доменной (агломерационной) шихты), подбора дутьевых параметров, оценки газодинамического и шлакового режимов доменной плавки вводятся планируемые параметры шихтовых материалов и дутьевых параметров.

Используемый принцип позволил построить математическую модель доменного процесса, предназначенную для решения сформулированных выше задач и обладающую свойствами адаптируемости структуры вычислений к конкретной технологической задаче с учетом существующей системы сбора информации и помехозащищенностью, то есть возможность получения достоверных оценок прогнозного изменения параметров работы печи по зашумленной информации. Необходимость блока «Настройка» в структуре модели, включающего подсистемы «Нормативно-справочная информация»; «Корректировочные коэффициенты»; «Настройка диагностики» обусловлена требованиями настройки модели на конкретные условия функционирования системы.

1.2. Математическое обеспечение решения задач по управлению комплексом доменных печей

1.2.1. Математическое обеспечение подсистемы формирования отчетных данных о работе доменных печей и цеха

Одной из основных функций подсистемы формирования отчетных данных о работе доменных печей является подготовка технического отчета доменного цеха. Технический отчет состоит из следующих нормативных разделов:

1. Выплавка чугуна.
2. Простои и тихий ход печей.
3. Выполнение графика выпусков.
4. Технологические показатели.

5. Расход, поступление и остатки сырья, топлива и других ресурсов и их качественные характеристики.

6. Баланс доменного газа по цеху.

7. Баланс железа по цеху.

8. Использование шлака по цеху.

9. Использование колошниковой пыли.

На основе анализа требований технологического персонала и нормативно-справочной информации доменного производства для каждого из перечисленных разделов составлено соответствующее математическое обеспечение, которое положено в основу программной реализации подсистемы отображения данных о работе доменных печей.

Выплавка чугуна. Сведения данного раздела технического отчета включают данные о плановых и фактических показателях выплавки передельного и литейного чугунов за месяц и с начала календарного года на всех доменных печах и цехе в целом. Планируемый и произведенный чугун по печам и по цеху учитывается двумя способами:

- в тоннах за период всего в натуре чугуна (суммированием передельного и литейного чугуна по каждой печи и по цеху);
- в тоннах чугуна за период, всего в пересчете на передельный чугун по каждой печи и по цеху.

Дополнительно в этом разделе требуется производить расчет:

- фактического выполнения в тоннах и процентах месячного и за период с начала года производства чугуна доменными печами и цехом;
- отклонений в тоннах фактически произведенного за месяц и за период с начала года чугуна доменными печами и цехом, от запланированного на месяц и на период с начала года чугуна доменным печам и цеху.

Простои и тихий ход печей. Текущие простои подразделяют на планируемые и не планируемые.

Планово-предупредительные ремонты ($ППР_{ДПi}^{мес}$) включают в себя профилактические остановки доменных печей для планируемых ремонтов механического, электрического, энергетического, гидравлического, оборудования КИП и наладки систем АСУ, кожуха и металлоконструкций, а также для планируемой замены воздушных фурм и амбразур:

$$ППР_{ДПi}^{мес} = \sum_{j=1}^M ППР_{ДПij}^{случ}, \quad (1.2.1)$$

где $ППР_{ДПj}^{луч}$ – планируемые простои i -й доменной печи по j -му нормативному случаю ($i=1,2,\dots, M$); i – количество доменных печей в цехе ($i=1,2,\dots, N$).

Для подсистемы формирования отчетных показателей простои на планово-предупредительные ремонты рассчитываются по каждой доменной печи и для цеха без классификации по причинам.

Не планируемые простои включают в себя:

- простои по отсутствию ($ПР_{ДП,ОТС}^{мес}$) кокса (K); железорудного сырья ($ЖС$); потребителей чугуна ($ПЧ$); топливно-энергетических ресурсов ($ТЭР$); простои, связанные с просадкой напряжения, недостатком газа, воды, пара, дутья чугуновозных ковшей и миксеров ($ЧКиМ$); шлаковых чаш ($ШлЧ$); материалов и запчастей на техническое обслуживание и поддержание оборудования ($ТО$):

$$ПР_{ДП,ОТС}^{мес} = \sum ПР_{ДП,К}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ЖС}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ПЧ}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ТЭР}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ЧКиМ}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ШлЧ}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ТО}^{мес} \quad (1.2.2)$$

Не планируемые текущие простои по отсутствию рассчитываются в подсистеме по каждой доменной печи и для цеха по каждому из перечисленных наименований причин простоев;

- ремонты, в том числе по причине инцидентов ($ПР_{ДП,Р}^{мес}$) механического оборудования ($МО$); электрического оборудования ($ЭлО$); энергетического оборудования ($ЭнО$); гидравлического оборудования ($ГО$); оборудования КИПиА ($КИПиА$); кожуха и металлоконструкций ($КиМ$):

$$ПР_{ДП,Р}^{мес} = \sum ПР_{ДП,МО}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ЭлО}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ЭнО}^{мес} + \sum ПР_{ДП,ГО}^{мес} + \sum ПР_{ДП,КИПиА}^{мес} + \sum ПР_{ДП,КиМ}^{мес} \quad (1.2.3)$$

Не планируемые текущие простои по ремонту оборудования в часах минутах рассчитываются подсистемой по каждой доменной печи и для цеха по каждому из перечисленных выше наименований причин простоев оборудования.

- замена воздушных фурм и амбразур ($ПР_{ДП,ЗВФ}^{мес}$);
- горновые работы ($ПР_{ДП,ГР}^{мес}$);
- простои по технологическим причинам ($ПР_{ДП,ТП}^{мес}$);
- аварии ($ПР_{ДП,А}^{мес}$);

- прочие причины ($PP_{ДП,П}^{мес}$).

Не планируемые текущие простои по причинам рассчитываются в подсистеме по каждой доменной печи и для цеха по каждому из выше перечисленных наименований причин простоев.

Сумма планируемых простоев всех наименований и не планируемых простоев по печи в часах-минутах равна общим текущим простоям ($ОТП_{ДП}^{мес}$) по печи:

$$ОТП_{ДП}^{мес} = ППР_{ДП}^{мес} + PP_{ДП,ОТС}^{мес} + PP_{ДП,Р}^{мес} + PP_{ДП,ЗВФ}^{мес} + PP_{ДП,ГР}^{мес} + PP_{ДП,ТП}^{мес} + PP_{ДП,А}^{мес} + PP_{ДП,П}^{мес}. \quad (1.2.4)$$

Очевидно, общие текущие простои по цеху ($ОТП_{ЦЕХ}^{мес}$) в часах-минутах равны сумме цеховых планируемых простоев и цеховых не планируемых простоев.

где $НС_{ДП}^{мес}$ – количество номинальных суток работы печи за месяц в сутках.

Текущие простои в процентах по цеху за месяц рассчитываются следующим образом. Сначала определяется доля простоев каждой печи ($ДТП_{ДП, \%}^{мес}$) в цеховых простоях:

$$ДТП_{ДП, \%}^{мес} = \frac{V_{П, ДП}}{V_{П, ЦЕХ}} \cdot \frac{ОТП_{ДП}^{мес}}{24 \cdot НС_{ЦЕХ}^{мес}} \cdot 100, \quad (1.2.5)$$

где $V_{П}$ – полезный объем печи (цеха); $НС_{ЦЕХ}^{мес}$ – номинальные сутки цеха за месяц. Тогда цеховые текущие простои в процентах за месяц определяются суммированием долей каждой печи в простоях цеха:

$$ТП_{ЦЕХ, \%}^{мес} = \sum_{i=1}^N ДТП_{ДП_i}^{мес}. \quad (1.2.6)$$

Здесь N – количество работающих доменных печей в цехе.

Тихие хода в процентах по каждой доменной печи и цеху рассчитываются аналогично простоям доменных печей. Для полного анализа потерь производства автоматической системой учета предусматривается учет по причинам тихих ходов. Классификация причин тихих ходов аналогична классификации для не планируемых простоев.

Выполнение графика выпусков. Количество фактически выданных выпусков каждой печью и цехом за месяц ($B_{ДП, ф}^{мес}$) определяется суммированием количества фактически выданных выпусков за сутки $B_{ДП, ф}^{сут}$:

$$B_{ДП, ф}^{мес} = \sum B_{ДП, ф}^{сут}, \quad (1.2.7)$$

Плановое количество выпусков (ПКВ) определяется суммированием фактически выданных и потерянных выпусков (ПВ):

$$ПКВ_{ДП}^{мес} = В_{ДП,ф}^{мес} + ПВ_{ДП}^{мес}, \quad (1.2.8)$$

Плановое количество выпусков может быть рассчитано также как разность между установленным графиком количеством выпусков (УГКВ) и количеством потерянных выпусков (ПВ) по причине текущих простоев доменных печей:

$$ПКВ_{ДП}^{мес} = УГКВ_{ДП}^{мес} - ПВ_{ДП,пр}^{мес}. \quad (1.2.9)$$

Здесь $УГКВ_{ДП}^{мес}$ установленное графиком выпусков количество выпусков; $ПВ_{ДП,пр}^{мес}$ – количество выпусков, потерянных по причине текущих простоев.

Показатель выполнения графика выпусков (ВГВ) есть процентное содержание количества фактически выданных выпусков (В) от количества плановых выпусков (ПКВ):

$$ВГВ_{ДП, \%}^{мес} = \frac{В_{ДП,ф}^{мес}}{ПКВ_{ДП}^{мес}} \cdot 100, \quad (1.2.10)$$

Показатель выполнения графика выпусков с начала года определяется аналогично.

Технико-экономические показатели доменных печей. Количество номинальных суток работы печи за месяц определяется по разности между календарными ($КС^{мес}$) и ремонтными ($РС_{ДП}^{мес}$) сутками работы печи:

$$НС_{ДП}^{мес} = КС^{мес} - РС_{ДП}^{мес}. \quad (1.2.11)$$

Количество номинальных суток работы цеха за месяц:

$$НС_{ЦЕХ}^{мес} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{n,i} \cdot НС_{ДП,i}^{мес}}{\sum_{i=1}^N V_{n,i}}, \quad (1.2.12)$$

где $V_{n,i}$ – полезный объем i -й доменной печи, $м^3$.

Количество номинальных суток работы цеха за период с начала года (целое число месяцев), определяется в следующей последовательности:

- 1) определяется количество номинальных суток работы цеха за каждый месяц периода по формуле (1.2.12);
- 2) определяется количество метросуток работы цеха за каждый месяц:

$$МС_{ЦЕХ}^{мес} = НС_{ЦЕХ}^{мес} \cdot V_{n,ЦЕХ}, \quad (1.2.13)$$

где $V_{n,ЦЕХ}$ – полезный объем цеха за месяц определяется суммированием всех проектных объемов доменных печей, работавших в данном месяце. Месячный полезный объем цеха может отличаться от проектного в случае, если одна из печей была на ремонте или в резерве полный месяц;

- 3) суммируются месячные метросутки работы цеха за отчетный период с начала календарного года:

$$MC_{ЦЕХ}^{год} = \sum_{i=1}^K MC_{ЦЕХ,i}^{мес} . \quad (1.2.14)$$

Здесь K – количество отчетных периодов (месяцев) с начала календарного года;

- 4) суммируются месячные объемы цеха за отчетный период с начала года.

$$V_{n,ЦЕХ}^{год} = \sum_{i=1}^K V_{n,ЦЕХ,i}^{мес} ; \quad (1.2.15)$$

- 5) количество номинальных суток работы цеха за период с начала календарного года определяется делением суммы количества месячных метросуток за отчетный период на сумму месячных полезных объемов, умноженных на число месяцев в отчетном периоде.

$$HC_{ЦЕХ}^{год} = \frac{MC_{ЦЕХ}^{год}}{V_{n,ЦЕХ}^{год}} \cdot N , \quad (1.2.16)$$

где N – число месяцев в отчетном периоде.

Производство среднесуточное по доменной печи, т:

$$P_{ДП,сут}^{мес} = \frac{P_{ДП}^{мес}}{HC_{ДП}^{мес}} , \quad (1.2.17)$$

где $P_{ДП}^{мес}$ – среднемесячное производство чугуна по печи, т.

Коэффициент полезного использования объема (КИПО) печи и цеху рассчитывается путем деления полезного объема печи на среднесуточное производство чугуна:

$$КИПО_{ДП}^{мес} = \frac{V_{n,ДП}^{мес}}{P_{ДП,сут}^{мес}} , \quad (1.2.18)$$

Для определения КИПО по цеху с начала года сначала определим полезный объем цеха с начала года:

$$V_{n,ЦЕХ}^{год} = \sum_{i=1}^K V_{n,ЦЕХ,i}^{мес} , \quad (1.2.19)$$

Удельная производительность по доменной печи, т/м³:

$$P_{уд,ДП} = \frac{P_{ДП,сут}}{V_{н,ДП}}. \quad (1.2.20)$$

Аналогично рассчитывается производительность по цеху за месяц и по цеху с начала года.

Интенсивность плавки по руде по доменной печи, кг/ (м³ сут):

$$I_{р,ДП}^{мес} = \frac{M_{ш,ДП}^{мес} \cdot 1000 \cdot HC_{ДП}^{мес}}{V_{н,ДП}^{мес}}, \quad (1.2.21)$$

где $M_{ш,ДП}$ – рудная часть шихты, т.

Аналогично рассчитывается интенсивность плавки по руде по цеху за месяц и по цеху с начала года.

Интенсивность плавки по сожженному углероду по доменной печи, кг/ (м³ сут):

$$I_{с,ДП}^{мес} = \frac{\left(\frac{K_{ДП}^{мес} \cdot C_{к}^{мес}}{100} + \frac{ПГ_{ДП}^{мес} \cdot g_{ПГ,ДП}^{мес} \cdot C_{ПГ}^{мес}}{100} \right) \cdot HC_{ДП}^{мес} \cdot 1000}{V_{н,ДП}^{мес}}. \quad (1.2.22)$$

Здесь $K_{ДП}^{мес}$ – количество сожженного сухого кокса за месяц, т; $C_{к}^{мес}$ – среднемесячное процентное содержание углерода в коксе, %, рассчитываемое по формуле:

$$C_{к}^{мес} = 100 - A - S - L, \quad (1.2.23)$$

где A , S , L – среднемесячное процентное содержание соответственно золы, серы, летучих в коксе, %; $ПГ_{ДП}^{мес}$ – месячный расход природного газа по доменной печи, тыс. м³; $g_{ПГ,ДП}^{мес}$ – удельный вес природного газа, кг/м³; $C_{ПГ}^{мес}$ – среднемесячное процентное содержание углерода в природном газе, %.

Интенсивность плавки по сожженному углероду по цеху за месяц, кг/ (м³ сут), рассчитывается по формуле, аналогичной (1.2.22), только расходы кокса и природного газа берутся соответственно среднецеховые.

Удельный выход шлака ($U_{шп,уд,ДП}^{мес}$, кг/т чугуна) из доменной печи определяется по балансу основных шлакообразующих оксидов: CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , TiO_2 и MnO . В приходной части баланса учитывается поступление этих оксидов с шихтовыми материалами, а в расходной – потери этих же оксидов с колошниковой пылью, шламами и восстановлением SiO_2 , TiO_2 и MnO соответственно в Si , Ti , Mn чугуна. По разности между суммарными статьями прихода ($G_{\Sigma}^{ПРИХ}$) и указанными суммарными статьями расхода

(G_{Σ}^{PACX}) определяется количество оксидов CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , TiO_2 , MnO , перешедшее в шлак. Делением полученного результата на суммарное содержание (CaO), (SiO_2), (MgO), (Al_2O_3), (TiO_2), (MnO), определенное анализом, устанавливают удельный выход шлака:

$$U_{\text{шл, уд, ДП}}^{\text{мес}} = \frac{G_{\Sigma}^{\text{ПРИХ}} - G_{\Sigma}^{\text{PACX}}}{CaO + SiO_2 + MgO + Al_2O_3 + TiO_2 + MnO} \cdot 100. \quad (1.2.24)$$

Приведем алгоритм расчета выхода шлака из доменной печи для условий работы доменного цеха ОАО «ММК». Исходные данные для расчета прихода шлакообразующих оксидов следующие:

- 1) расходы рудной части шихты, кг/т чугуна: агломерат (M_A), окатыши (M_{OK}), руда железная ($M_{PЖ}$), руда Марганцевая (M_{PMux}), сварочный шлак ($M_{C6Ш}$), корольки (M_{Kop}), прессованная окалина ($M_{МБП}$).
- 2) флюсы, кг/т чугуна: известняк ($M_{ИЗБ}$), кварцит (M_{K6}).
- 3) удельный расход кокса сухого ($k_{ДП}^{\text{мес}}$), кг/т чугуна;
- 4) процентное содержание шлакообразующих оксидов в железорудных материалах, флюсах и золе кокса ($3K$).

Приход шлакообразующих оксидов определяется как сумма приходов CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , TiO_2 , MnO , кг/т чугуна:

$$G_{\Sigma}^{\text{ПРИХ}} = G_{CaO}^{\text{ПРИХ}} + G_{SiO_2}^{\text{ПРИХ}} + G_{MgO}^{\text{ПРИХ}} + G_{Al_2O_3}^{\text{ПРИХ}} + G_{TiO_2}^{\text{ПРИХ}} + G_{MnO}^{\text{ПРИХ}}. \quad (1.2.25)$$

Приход шлакообразующего оксида в общем случае, кг/т:

$$\begin{aligned} G_{XO}^{\text{ПРИХ}} = & \frac{M_A XO^A}{100} + \frac{M_{OK} XO^{OK}}{100} + \frac{M_{PЖ} XO^{PЖ}}{100} + \frac{M_{PMux} XO^{PMux}}{100} + \\ & + \frac{M_{C6Ш} XO^{C6Ш}}{100} + \frac{M_{Kop} XO^{Kop}}{100} + \frac{M_{МБП} XO^{МБП}}{100} + \frac{M_{ИЗБ} XO^{ИЗБ}}{100} + \\ & + \frac{M_{K6} XO^{K6}}{100} + \frac{k_{ДП}^{\text{мес}} \cdot A_K XO^{3K} \cdot A_K}{100}. \end{aligned} \quad (1.2.26)$$

Расход шлакообразующих оксидов определяется как сумма потерь с колошниковой пылью ($G_{КП}^{PACX}$) и шламами ($G_{ШЛАМ}^{PACX}$), а также с восстановлением оксидов SiO_2 , TiO_2 , MnO соответственно в Si , Ti , Mn чугуна ($G_{чуг}^{PACX}$):

$$G_{\Sigma}^{PACX} = G_{КП}^{PACX} + G_{ШЛАМ}^{PACX} + G_{чуг}^{PACX}. \quad (1.2.27)$$

Исходные данные для расчета расхода шлакообразующих следующие:

- 1) выход колошниковой пыли, кг/т чугуна (КП);
- 2) выход шлама, кг/т чугуна (ВШ);
- 3) процентное содержание шлакообразующих оксидов в колошниковой пыли и шламе;
- 4) содержание кремния, титана, марганца в чугуне, %.

Расход (потери) шлакообразующих оксидов, кг/т:

$$G_n^{PACX} = \sum \frac{M_n XO^n}{100} \quad (1.2.28)$$

Расход шлакообразующих при восстановлении оксидов кремния, титана и марганца в чугун определяется следующим образом, кг/т чугуна:

$$G_{\text{чуг}}^{PACX} = \frac{1000 \cdot \text{Si} \cdot 60}{100 \cdot 28} + \frac{1000 \cdot \text{Ti} \cdot 80}{100 \cdot 48} + \frac{1000 \cdot \text{Mn} \cdot 71}{100 \cdot 55}. \quad (1.2.29)$$

Выход шлака по цеху за месяц рассчитывается следующим образом, кг/т чугуна:

- 1) определяется месячное количество шлака по печам, т:

$$U_{\text{шл, ДП}}^{\text{мес}} = \frac{U_{\text{шл, уд, ДП}} \cdot P_{\text{ДП}}^{\text{мес}}}{1000}, \quad (1.2.30)$$

где $U_{\text{шл, уд, ДП}}^{\text{мес}}$ – среднемесячный удельный выход шлака, рассчитанный по уравнению (3.1.25), кг/ т чугуна; $P_{\text{ДП}}^{\text{мес}}$ – среднемесячное производство чугуна (отчетное) по печи, т;

- 2) полученные значения количества шлака суммируются по всем печам, в результате чего определяется общее количество шлака в тоннах за месяц на цех:

$$U_{\text{шл, цех}}^{\text{мес}} = \sum_{i=1}^N U_{\text{шл, ДП } i}^{\text{мес}}. \quad (1.2.31)$$

Здесь N – количество доменных печей, работающих в отчетном периоде;

- 3) определяется выход шлака по цеху за месяц, кг/т чугуна:

$$U_{\text{шл, уд, цех}}^{\text{мес}} = \frac{U_{\text{шл, цех}}^{\text{мес}}}{P_{\text{цех}}^{\text{мес}}}. \quad (1.2.32)$$

Удельный выход уловленной колошниковой пыли (кг/т чугуна) рассчитывается следующим образом. На производстве существует оперативный ежесуточный и бухгалтерский месячный учет колошниковой пыли.

Общее количество пыли по каждой доменной печи за месяц определяется суммированием суточных количеств пыли по каждой печи. Общее количество пыли по цеху за месяц определяется суммированием месячных печных значений количества пыли.

Бухгалтерский месячный учет колошниковой пыли осуществляется следующим образом. По завершении каждого месяца должны быть получены следующие данные:

- количество вагонов с пылью, отправленных в цех подготовки агломерационной шихты ($N_{\text{ваг, ЦПАШ}}$);
- усредненный вес одного вагона влажной пыли ($G_{\text{ваг}}$, т) и усредненная влажность пыли ($\overline{W_{\text{КП}}}$, %).

- 1) Сначала определяется общий вес влажной колошниковой пыли ($BKP_{\text{ЦПАШ}}^{\text{мес}}$), отправленной на ЦПАШ, т:

$$BKP_{\text{ЦПАШ}}^{\text{мес}} = G_{\text{ваг}} \cdot N_{\text{ваг, ЦПАШ}} \quad (1.2.33)$$

- 2) Затем определяется общий вес сухой пыли, отправленной на ЦПАШ за месяц, т:

$$СКП_{\text{ЦПАШ}}^{\text{мес}} = BKP_{\text{ЦПАШ}}^{\text{мес}} \cdot \frac{100 - \overline{W_{\text{КП}}}}{100} \quad (1.2.34)$$

Общий вес сухой колошниковой пыли за месяц в тоннах по доменному цеху (бухгалтерский учет) получится сложением сухой пыли, отправленной на ЦПАШ за месяц ($СКП_{\text{ЦПАШ}}^{\text{мес}}$), и сухой пыли, отправленной на Цементный завод за месяц ($СКП_{\text{ЦементЗавод}}^{\text{мес}}$), т:

$$СКП_{\Sigma}^{\text{мес}} = СКП_{\text{ЦПАШ}}^{\text{мес}} + СКП_{\text{ЦементЗавод}}^{\text{мес}} \quad (1.2.35)$$

Выход колошниковой пыли за месяц по цеху определяется следующим образом, кг/т чугуна:

$$СКП_{\text{уд, ЦЕХ}}^{\text{мес}} = \frac{СКП_{\Sigma}^{\text{мес}}}{P_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}}} \cdot 1000, \quad (1.2.36)$$

где $P_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}}$ – производство месячное чугуна по цеху, т.

Выход колошниковой пыли по печи (кг/т чугуна) определяется следующим образом:

- 1) рассчитывается общее количество влажной колошниковой пыли по цеху, полученное оперативным учетом:

$$BKP_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}} = КП_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}} - СКП_{\text{ЦементЗавод}}^{\text{мес}}; \quad (1.2.37)$$

- 2) общее количество влажной пыли, полученное оперативным учетом, переводится в сухую:

$$СКП_{ЦЕХ}^{мес} = ВКП_{ЦЕХ}^{мес} \cdot \frac{100 - \overline{W}_{КП}}{100}; \quad (1.2.38)$$

- 3) рассчитывается общее количество сухой колошниковой пыли, определяемое оперативным учетом, т:

$$КП_{ЦЕХ}^{мес} = СКП_{ЦЕХ}^{мес} + СКП_{ЦемЗавод}^{мес}; \quad (1.2.39)$$

- 4) корректировочный коэффициент (K) вычисляется делением общего месячного веса сухой колошниковой пыли по цеху в тоннах, полученной бухгалтерским учетом, на общий месячный вес сухой колошниковой пыли по цеху в тоннах, полученной оперативным учетом по суточным рапортам:

$$K = \frac{СКП_{\Sigma}^{мес}}{КП_{ЦЕХ}^{мес}}; \quad (1.2.40)$$

- 5) вес колошниковой пыли по каждой печи в тоннах с учетом корректирующего коэффициента:

$$ВКП_{ДП}^{мес} = КП_{ДП}^{мес} \cdot K; \quad (1.2.41)$$

- 6) определим общий вес сухой пыли по каждой печи за месяц в тоннах:

$$КП_{ДП}^{мес} = ВКП_{ДП}^{мес} \cdot \frac{100 - \overline{W}_{КП}}{100}; \quad (1.2.42)$$

- 7) определим удельный выход сухой колошниковой пыли для каждой печи, кг/т чугуна:

$$КП_{уд,ДП}^{мес} = \frac{КП_{ДП}^{мес}}{P_{ДП}^{мес}}. \quad (1.2.43)$$

здесь $P_{ДП}^{мес}$ – средне месячное производство чугуна по доменной печи (по сливу), т.

Содержание железа в железорудной части шихты по доменной печи за месяц (%). К железорудной части шихты (ЖРЧ) относятся: агломерат всех фабрик, окатыши всех видов, руда железная всех видов. Для определения содержания железа ($Fe_{ЖРЧ,ДП}^{мес}$, %) необходимо величину расхода железа (в тоннах или в кг/т чугуна) железорудной части шихты ($G_{Fe,ЖРЧ,ДП}^{мес}$) разделить на сумму расходов этих компонентов (в тоннах или в кг/т чугуна) и умножить на 100:

$$Fe_{ЖРЧ,ДП}^{мес} = \frac{G_{Fe,ЖРЧ,ДП}^{мес}}{G_{Агл} + G_{Ок} + G_{РЖ}} \cdot 100, \quad (1.2.44)$$

где $G_{A_{2l}}$ – расход агломерата, т или кг/т чугуна; $G_{Oк}$ – расход окатышей, т или кг/т чугуна; $G_{PЖ}$ – расход руды железной, т или кг/т чугуна.

Содержание железа в железорудной части шихты по цеху за месяц рассчитаем также, как и для отдельной доменной печи за месяц по уравнению (1.2.44), только в качестве исходных данных для расчета подставим цеховые расходы железа и расходы железорудных материалов.

Содержание железа в железорудной части шихты по цеху с начала года определим аналогично по уравнению (1.2.44), только в качестве исходных данных для расчета подставим цеховые расходы железа и железорудных материалов за период с начала года.

Процентную долю агломерата в железорудной части шихты по каждой доменной печи ($P_{A_{2l},ДП}^{мес}$) определим как отношение суммарного расхода всех фабрик агломерата ($G_{A_{2l},ДП}^{мес}$, т или в кг/т чугуна), проплавленных печью за месяц, ко всему расходу железорудной части шихты за месяц ($G_{ЖРМДП}^{мес}$, т или в кг/т чугуна), %:

$$P_{A_{2l},ДП}^{мес} = \frac{\sum_{i=1}^P G_{A_{2l},ДП,i}^{мес}}{G_{ЖРМДП}^{мес}} \cdot 100. \quad (1.2.45)$$

Здесь P – общее количество фабрик по производству агломерата.

Аналогичным образом определяется процентная доля агломерата в железорудной части шихты по цеху за месяц ($P_{A_{2l},ЦЕХ}^{мес}$) и процентная доля агломерата в железорудной части шихты по цеху с начала года ($P_{A_{2l},ЦЕХ}^{год}$).

Процентную долю окатышей в железорудной части шихты по каждой доменной печи ($P_{Oк,ДП}^{мес}$) рассчитаем как отношение суммарного расхода всех видов окатышей ($G_{Oк,ДП}^{мес}$, т или в кг/т чугуна), проплавленных печью за месяц, ко всему расходу железорудной части шихты за месяц, %:

$$P_{Oк,ДП}^{мес} = \frac{\sum_{i=1}^T G_{Oк,ДП,i}^{мес}}{G_{ЖРМДП}^{мес}} \cdot 100. \quad (1.2.46)$$

Здесь T – общее количество всех видов окатышей.

Рудную нагрузку на тонну влажного кокса по доменной печи $P_{H,вл,ДП}^{мес}$ рассчитываем как отношение расхода рудной части железорудной шихты (сухой) за месяц ($G_{ЖРМДП}^{мес}$, в тоннах

или в кг/т чугуна) к расходу влажного кокса ($k_{вл,ДП}^{мес}$, в тоннах или в кг/т чугуна) по этой же печи за месяц. Рудная нагрузка рассчитывается без учета выноса пыли.

$$P_{Н,вл,ДП}^{мес} = \frac{G_{ЖРМДП}^{мес}}{k_{вл,ДП}^{мес}}. \quad (1.2.47)$$

Рудную нагрузку на тонну сухого кокса по печи, по цеху за месяц и сначала года рассчитываем аналогично по уравнению (1.2.47), только в знаменателе подставляем расходы сухого кокса.

Количество осадок шихты и перешихтовок с начала года определим сложением количества случаев осадок и перешихтовок по нарастающей с начала года.

Определим минутный расход дутья по печи за месяц ($V_{Д,ДП}^{мес}$), тыс. м³/мин:

$$V_{Д,ДП}^{мес} = \frac{V_{Д,ЦЭСТ}}{60} \cdot 1000. \quad (1.2.48)$$

Минутный расход дутья по цеху за месяц рассчитаем следующим образом:

- 1) определим расход дутья по каждой доменной печи за месяц в тыс. м³:

$$V_{Д,ДП}^{мес} = V_{Д,ЦЭСТ} \cdot 24 \cdot HC_{ДП}^{мес}; \quad (1.2.49)$$

- 2) рассчитаем общий расход дутья на цех в тыс. м³ за месяц:

$$V_{Д,ЦЕХ}^{мес} = \sum_{i=1}^N V_{Д,ДПi}^{мес}, \quad (1.2.50)$$

где N – количество доменных печей, работающих в отчетном периоде;

- 3) определим минутный месячный расход дутья по цеху, тыс. м³/мин:

$$V_{Д,ЦЕХ}^{мес} = \frac{V_{Д,ЦЕХ}^{мес}}{HC_{ЦЕХ}^{мес}} \cdot \frac{24}{60} \cdot 1000. \quad (1.2.51)$$

Минутный расход дутья по цеху с начала года определяется аналогичным способом, только вместо общего расхода дутья по цеху в месяц берется общий расход дутья по цеху за год.

Средние значения давления дутья по цеху за месяц рассчитаем как средневзвешенные по расходу дутья:

$$\overline{P_{Д,ЦЕХ}^{мес}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \left(\frac{\overline{P_{Д,ДПi}^{мес}} \cdot V_{Д,ДПj}^{мес}}{V_{Д,ЦЕХ,j}^{мес}} \right). \quad (1.2.52)$$

Здесь N – количество доменных печей, работающих в отчетном периоде, K – количество отчетных периодов (месяцев).

Средние значения давления дутья с начала года рассчитаем как средневзвешенные по расходу дутья (по данным ПВЭС) за отчетный период:

- 1) определим общий расход дутья (по данным ПВЭС) за отчетный период с начала года по каждой доменной печи, тыс. м³:

$$V_{Д,ДП\Sigma}^{год} = \sum_{i=1}^K V_{Д,ДПi}^{мес}; \quad (1.2.53)$$

- 2) определим общий расход дутья по цеху с начала года (по данным ПВЭС):

$$V_{Д,ЦЕХ\Sigma}^{год} = \sum_{i=1}^K V_{Д,ЦЕХi}^{мес}; \quad (1.2.54)$$

- 3) рассчитаем средние значения давления дутья по цеху с начала года:

$$\overline{P_{Д,ЦЕХ}^{год}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \overline{P_{Д,ЦЕХi}^{мес}} \cdot V_{Д,ЦЕХj}^{мес}}{V_{Д,ЦЕХ,\Sigma}^{год}}. \quad (1.2.55)$$

Средние значения температуры горячего дутья по цеху за месяц определим как средневзвешенные по расходу дутья (по данным ЦЭСТ) за отчетный период, °С:

$$\overline{T_{Д,ЦЕХ}^{мес}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \left(\frac{\overline{T_{Д,ДПi}^{мес}} \cdot V_{Д,ДПj}^{мес}}{V_{Д,ЦЕХ}^{год}} \right). \quad (1.2.56)$$

Здесь $\overline{T_{Д,ДП}^{мес}}$ – средние значения температуры горячего дутья по печи за месяц, °С.

Средние значения расхода пара на увлажнение по цеху за месяц рассчитаем как средневзвешенные по расходу дутья (по данным ПВЭС) за отчетный период, г/м³:

$$\overline{G_{ПАРЦЕХ}^{мес}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \left(\frac{\overline{G_{ПАР,ДПi}^{мес}} \cdot V_{Д,ДПj}^{мес}}{V_{Д,ЦЕХ}^{год}} \right). \quad (1.2.57)$$

Здесь $\overline{G_{ПАР,ДП}^{мес}}$ – средние значения расхода пара на увлажнение дутья по печи за месяц, г/м³.

Содержание кислорода в дутье по печи за месяц ($\omega_{ДП}^{мес}$, %). Средние значения содержания кислорода в дутье с начала года по цеху определяются как средневзвешенные по расходу дутья (по данным ПВЭС) за отчетный период:

$$\overline{\omega_{ЦЕХ}^{год}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \overline{\omega_{ДПi}^{мес}} \cdot V_{Д,ЦЕХj}^{мес}}{V_{Д,ЦЕХ,\Sigma}^{год}}. \quad (1.2.58)$$

Отношение природного газа к дутью по печи ($\varepsilon_{ПГ}$, %) по печи и цеху за отчетный период (месяц и с начала года) определим как отношение расхода природного газа за месяц

по печи, цеху за отчетный период с начала года к расходу дутья (по данным ПВЭС) за месяц по печи, цеху за отчетный период соответственно:

$$\varepsilon_{ПГ,ДП}^{мес} = \frac{V_{ПГ,ДП}^{мес}}{V_{Д,ДП}^{мес}} \cdot 100, \quad (1.2.59)$$

Здесь $\overline{P_{КГ,ДП}^{мес}}$ – средние значения давления колошникового газа по печам за месяц, ати.

Средние значения давления колошникового газа по цеху за месяц определим как средневзвешенные по выходу колошникового газа (ВКГ) в тыс. м³ (по данным ЦЭСТ):

- 1) определим выход колошникового газа по доменной печи за месяц, тыс. м³:

$$V_{КГ,ДП}^{мес} = V_{КГ,ДП,ЦЭСТ}^{мес} \cdot 24 \cdot HС_{ДП}^{мес}; \quad (1.2.60)$$

- 2) рассчитаем общий выход колошникового газа на цех за месяц, тыс. м³:

$$V_{КГ,ЦЕХ}^{мес} = \sum_{i=1}^N V_{КГ,ДП_i}^{мес}. \quad (1.2.61)$$

Здесь N – количество доменных печей, работающих в отчетном периоде;

- 3) определим средние значения давления колошникового газа по цеху за месяц:

$$\overline{P_{КГ,ЦЕХ}^{мес}} = \frac{\sum_{i=1}^N \overline{P_{КГ,ЦЕХ_i}^{мес}} \cdot V_{КГ,ДП_i}^{мес}}{V_{КГ,ЦЕХ,\Sigma}^{мес}}. \quad (1.2.62)$$

Среднее давление колошникового газа по цеху с начала года ($\overline{P_{КГ,ЦЕХ}^{год}}$, ати) определим как средневзвешенное по выходу колошникового газа (по данным ЦЭСТ) за отчетный период.

Средние значения температуры колошникового газа по печам за месяц ($\overline{T_{КГ,ДП_i}^{мес}}$, °С) возьмем из справки ЦЭСТ.

Средние значения температур колошникового газа по цеху за месяц определим как средневзвешенные по выходу колошникового газа (по данным ЦЭСТ), тыс. м³:

$$\overline{T_{КГ,ЦЕХ}^{мес}} = \frac{\sum_{i=1}^N \overline{T_{КГ,ДП_i}^{мес}} \cdot V_{КГ,ДП_i}^{мес}}{V_{КГ,ЦЕХ}^{мес}}. \quad (1.2.63)$$

Средние значения температур колошникового газа по цеху с начала года рассчитаем как средневзвешенные по выходу колошникового газа (по данным ЦЭСТ) за отчетный период.

Состав колошникового газа (CO , CO_2 и H_2 , %). Усреднение каждой составляющей колошникового газа для цеха за отчетный период с начала года определим как средневзвешенное по выходу колошникового газа:

$$CO_{KG, ЦЕХ}^{год} = \frac{\sum_{i=1}^N CO_{KG, ЦЕХi}^{мес} \cdot V_{KG, ЦЕХi}^{мес}}{V_{KG, ЦЕХ}^{год}}. \quad (1.2.64)$$

Аналогично усредним и процентные содержания CO_2 и H_2 по цеху с начала года.

Степень использования CO в колошниковом газе рассчитаем по формуле:

$$\eta_{CO} = \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \cdot 100. \quad (1.2.65)$$

Для расчета степени использования CO , CO_2 и H_2 для доменных печей за месяц в формулы (1.2.64) и (1.2.65) подставим усредненные месячные значения составляющих элементов колошникового газа по каждой доменной печи.

Для расчета среднецеховой степени использования колошникового газа за месяц подставим в формулу (1.2.64) цеховые усредненные значения за месяц колошникового газа. Для расчета показателя степени использования колошникового газа за период с начала года подставим в формулу (1.2.65) усредненные значения анализа газа за соответствующий период с начала года.

Качество чугуна – это массовая доля чугуна с содержанием в нем серы менее или равной 0,020% от всего произведенного чугуна за отчетный период печью или цехом в процентах.

Показатель качества чугуна за отчетный период с начала года ($\eta_{KачЧyzЦЕХ}^{год}$, %) определим следующим образом:

- 1) рассчитаем количество произведенного по цеху качественного чугуна ($P_{KачЧyz}^{мес}$)

(серы менее или равно 0,020%) за каждый месяц периода, т:

$$P_{KачЧyzЦЕХ}^{мес} = \frac{P_{KачЧyz}^{мес} \cdot P_{ЦЕХ}^{мес}}{100}, \quad (1.2.66)$$

где $P_{ЦЕХ}^{мес}$ – производство чугуна по цеху за месяц, т;

- 2) рассчитаем общее количество качественного чугуна по цеху за весь отчетный период с начала календарного года, т:

$$P_{KачЧyzЦЕХ}^{год} = \sum_{i=1}^K P_{KачЧyzЦЕХi}^{мес}; \quad (1.2.67)$$

- 3) определим общее количество всего произведенного чугуна за период, т:

$$P_{ЦЕХ}^{год} = \sum_{i=1}^K P_{ЦЕХi}^{мес}; \quad (1.2.68)$$

4) рассчитаем показатель качества чугуна за отчетный период с начала года, %:

$$\eta_{КачЧугЦЕХ}^{год} = \frac{P_{КачЧугЦЕХ}^{год}}{P_{ЦЕХ}^{год}} \cdot 100.$$

Проплавка рудной части сырья (ЖРЧ) по доменной печи за месяц, по цеху за месяц и по цеху за период с начала года вычислим соответственно по формулам, т:

$$P_{ЖРЧ,ДП}^{мес} = G_{ЖРЧ,ДП}^{мес} \cdot HC_{ДП}^{мес}, \quad (1.2.69)$$

Здесь $G_{ЖРЧ,ДП}^{мес}$, $G_{ЖРЧ,ЦЕХ}^{мес}$, $G_{ЖРЧ,ЦЕХ}^{год}$ – расходы ЖРЧ соответственно по доменной печи за месяц, по цеху за месяц и за период с начала года, т/сут.

Количество сожженного кокса влажного по доменной печи за месяц, по цеху за месяц и по цеху за период с начала года вычислим соответственно по формулам, т:

$$k_{вл,ДП}^{мес} = K_{вл,ДП}^{мес} \cdot HC_{ДП}^{мес}, \quad (1.2.70)$$

Здесь $K_{вл,ДП}^{мес}$, $K_{вл,ЦЕХ}^{мес}$, $K_{вл,ЦЕХ}^{год}$ – расходы влажного кокса в сутки соответственно по доменной печи за месяц, по цеху за месяц и по цеху за период с начала календарного года, т/сут.

Расход, поступление и остатки сырья, топлива и других ресурсов и их качественные характеристики. В подсистеме для данного раздела месячного технического отчета потребуются данные об:

- остатках в бункерах доменного цеха влажного или сухого неизрасходованного сырья в тоннах на начало ($O_{НМ,ЦЕХ}^{мес}$) и на конец ($O_{КМ,ЦЕХ}^{мес}$) отчетного месяца;
- приходе влажного или сухого сырья за месяц в тоннах ($G_{ПРИХ,ЦЕХ}^{мес}$);
- влажности сырья (W) и содержания железа в нем;
- отсеве агломерата сухого в тоннах за месяц.

Расход каждого вида влажного сырья в тоннах за отчетный месяц по цеху рассчитаем следующим образом:

$$G_{вл,ЦЕХ}^{мес} = O_{вл,НМ,ЦЕХ}^{мес} + G_{вл,ПРИХ,ЦЕХ}^{мес} - O_{вл,КМ,ЦЕХ}^{мес}. \quad (1.2.71)$$

Для агломерата кроме остатков по бухгалтерскому учету учитывается также отсев:

$$G_{Аглвл,ЦЕХ}^{мес} = O_{Аглвл,НМ,ЦЕХ}^{мес} + G_{Аглвл,ПРИХ,ЦЕХ}^{мес} - O_{Аглвл,КМ,ЦЕХ}^{мес} - OTT_{Аглвл,ЦЕХ}^{мес}. \quad (1.2.72)$$

Затем каждый вид влажного сырья переводится в расход сухого сырья:

$$G_{ЦЕХ}^{мес} = G_{вл,ЦЕХ}^{мес} \cdot \left(\frac{100 - W}{100} \right). \quad (1.2.73)$$

Удельный расход каждого вида сухого сырья по цеху за месяц определим по формуле, кг/т чугуна:

$$G_{удЦЕХ}^{мес} = \frac{G_{ЦЕХ}^{мес}}{P_{ЦЕХ}^{мес}}. \quad (1.2.74)$$

Расход каждого вида сырья в тоннах за месяц по доменным печам для технического отчета рассчитаем следующим образом:

- 1) сначала определим коэффициент пересчета ($\xi_{ЦЕХ,АСУ}^{мес}$) для каждого вида сырья, с помощью которого месячные печные расходы сырья приводятся в соответствие с бухгалтерским учетом сырья.

Для определения коэффициента пересчета цеховой расход каждого вида влажного сырья пересчитываем на сухую массу $G_{ЦЕХ,АСУ}^{мес}$ следующим образом:

$$G_{ЦЕХ,АСУ}^{мес} = \sum_{i=1}^K G_{сырЦЕХ}^{мес} \frac{100 - W_{сыр}^{мес}}{100}; \quad (1.2.75)$$

$G_{сырЦЕХ}^{мес}$ – цеховой расход соответствующего сырья в отчетном месяце, т/месяц;

- 2) расход каждого вида сухого сырья по цеху за месяц по бухгалтерскому учету $G_{ЦЕХ,Бухг}^{мес}$ поделим на расход этого же вида сухого сырья по цеху за месяц. Получим коэффициент пересчета:

$$\xi_{ЦЕХ,АСУ}^{мес} = \frac{G_{ЦЕХ,Бухг}^{мес}}{G_{ЦЕХ,АСУ}^{мес}}; \quad (1.2.76)$$

- 3) месячный расход каждого вида сырья по каждой доменной печи переводим на сухую массу по формуле, аналогичной (1.2.73), однако подставляем в нее расходы материалов по печам, а значения влажности оставим прежними;
- 4) расход каждого вида сухого сырья для каждой доменной печи умножим на коэффициент пересчета для этого же вида сырья. Получим уточненные месячные расходы сухого сырья для каждой печи в тоннах, которые идут в технический отчет:

$$G_{ДП}^{мес} = G_{ДП,АСУ}^{мес} \cdot \xi_{ЦЕХ,АСУ}^{мес}. \quad (1.2.77)$$

Удельный расход каждого вида сухого сырья по печи за месяц рассчитаем по формуле, кг/т чугуна:

$$G_{удДП}^{мес} = \frac{G_{ДП}^{мес}}{P_{ДП}^{мес}}. \quad (1.2.78)$$

Удельный расход каждого вида сухого сырья по цеху в кг/т чугуна за отчетный период с начала года определим следующим образом:

- 1) определим расход каждого вида сухого сырья по цеху в тоннах за отчетный период с начала года:

$$G_{ЦЕХ}^{год} = \sum_{i=1}^K G_{ЦЕХi}^{мес}, \quad (1.2.79)$$

где K – количество отчетных периодов (месяцев);

- 2) рассчитаем удельный расход каждого вида сухого сырья по цеху в кг/т чугуна за отчетный период с начала года:

$$G_{удЦЕХ}^{мес} = \frac{G_{ЦЕХ}^{год}}{P_{ЦЕХ}^{год}} \cdot 1000, \quad (1.2.80)$$

где $P_{ЦЕХ}^{год}$ – производство чугуна за отчетный период с начала года, т.

Величину «Итого железорудной шихты» для каждой печи рассчитаем сложением всех видов железорудного сырья, расходуемых за месяц. К железорудной части шихты (ЖРЧ) относятся: агломерат всех фабрик ($A_{гл}$), окатыши всех видов (O_k), руда железная всех видов ($P_{уда}$), т:

$$G_{ЖРЧДП}^{мес} = G_{A_{гл}ДП}^{мес} + G_{O_kДП}^{мес} + G_{P_{уда}ДП}^{мес}. \quad (1.2.81)$$

Удельный расход ЖРЧ на доменной печи определим по формуле, кг/т чугуна:

$$G_{удЖРЧДП}^{мес} = \frac{G_{ЖРЧДП}^{мес}}{P_{ДП}^{мес}} \cdot 1000. \quad (1.2.82)$$

Очевидно, что общее количество рудной части в тоннах для каждой печи ($G_{РЧДП}^{мес}$) рассчитывается сложением всех видов железорудного сырья, израсходованных за месяц.

Удельные расходы рудной части шихты в кг/т чугуна определяются аналогично удельным расходам ЖРЧ в кг/т чугуна: см. (1.2.78) – (1.2.80).

Содержание железа в офлюсованной части шихты (%) по доменной печи за месяц. Офлюсованной частью шихты ($ОЧШ$) считается рудная (железосодержащая) часть шихты в тоннах вместе с флюсами ($G_{флДП}^{мес}$). Расчет расхода офлюсованной части шихты производим по следующим формулам:

$$G_{ОЧШДП}^{мес} = G_{РЧДП}^{мес} + \sum_{i=1}^K G_{флДПi}^{мес}. \quad (1.2.83)$$

Для расчета расхода офлюсованной части шихты за месяц по цеху в формулу (1.2.83) подставляются цеховые расходы. Для расчета расхода офлюсованной части шихты за год по цеху в полученную формулу подставляются годовые расходы.

Для определения содержания железа в процентах в офлюсованной части шихты ($Fe_{ОЧШДП}^{мес}$) необходимо расход железа (т или кг/т чугуна) рудной части шихты разделить на офлюсованную часть шихты (т или кг/т чугуна) и умножить на 100, %:

$$Fe_{ОЧШДП}^{мес} = \frac{G_{Fe, ОЧШДП}^{мес}}{G_{ОЧШДП}^{мес}} \cdot 100. \quad (1.2.84)$$

Выход шлама по каждой печи за месяц ($Q_{ШламДП}^{мес}$, т) рассчитаем пропорционально выходу колошниковой пыли по уравнению, т:

$$Q_{ШламДП}^{мес} = \frac{КП_{ДП}^{мес}}{КП_{ЦЕХ}^{мес}} \cdot Q_{ШламЦЕХ}^{мес}. \quad (1.2.85)$$

Удельный выход шлама по печи ($Q_{удШлам}$) определяется, кг/т чугуна:

$$Q_{удШламДП}^{мес} = \frac{Q_{ШламДП}^{мес}}{P_{ДП}^{мес}} \cdot 1000; \quad (1.2.86)$$

В подсистеме для технического отчета используются данные по расходам кокса сухого скипового, потерь сухого кокса от измельчения, кокса сухого металлургического и кокса влажного скипового.

Расход железа из ЖРС (или ЖРЧ) определим следующим образом:

1) рассчитаем расход железа из каждого компонента железорудной части шихты ($Q_{Fe}^{мес}$), расходуемого на печи за месяц, т/мес.:

из агломерата местных фабрик и из ямы:

$$Q_{Fe, Агл}^{мес} = \frac{G_{Агл}^{мес} \cdot Fe_{Агл}^{мес}}{100}; \quad (1.2.87)$$

из окатышей всех видов:

$$Q_{Fe, Ок}^{мес} = \frac{G_{Ок}^{мес} \cdot Fe_{Ок}^{мес}}{100}; \quad (1.2.88)$$

из руд железных всех видов:

$$Q_{Fe, Руда}^{мес} = \frac{G_{Руда}^{мес} \cdot Fe_{Руда}^{мес}}{100}. \quad (1.2.89)$$

Здесь $G_{Агл}^{мес}$, $G_{Ок}^{мес}$, $G_{Руда}^{мес}$ – расходы соответственно агломерата, окатышей и руды в отчетном месяце, т; $Fe_{Агл}^{мес}$, $Fe_{Ок}^{мес}$, $Fe_{Руда}^{мес}$ – содержание Fe соответственно в агломерате, окатышах и руде в отчетном месяце, %. Примечание: для расчетов берутся данные по сухой массе материалов;

- 2) полученные расходы железа из компонентов складываем и получаем общий расход железа из железорудной части шихты по печи за месяц, т:

$$Q_{Fe,ЖРЧДП}^{мес} = Q_{Fe,Агл}^{мес} + Q_{Fe,Ок}^{мес} + Q_{Fe,Руда}^{мес}. \quad (1.2.90)$$

Удельный расход железа из железорудной части шихты за месяц определили для отдельной печи по формуле:

$$Q_{удFe,ЖРЧДП}^{мес} = \frac{Q_{Fe,ЖРЧДП}^{мес}}{P_{ДП}^{мес}} \cdot 1000; \quad (1.2.91)$$

Расходы железа из рудной части шихты для печи за месяц рассчитали следующим образом:

- 1) определили расход железа в тоннах из каждого компонента металлдобавок: руды марганцевой ($РМарг$), сварочного шлака ($СвШл$), корольков ($Кор$) и прессованной окалины ($МБП$):

$$Q_{Fe,РМаргДП}^{мес} = \frac{Q_{FeРМаргДП}^{мес} \cdot Fe_{РМарг}^{мес}}{100}; \quad (1.2.92)$$

$$Q_{Fe,СвШлДП}^{мес} = \frac{Q_{FeСвШлДП}^{мес} \cdot Fe_{СвШл}^{мес}}{100}; \quad (1.2.93)$$

$$Q_{Fe,КорДП}^{мес} = \frac{Q_{FeКорДП}^{мес} \cdot Fe_{Кор}^{мес}}{100}; \quad (1.2.94)$$

$$Q_{Fe,МБПДП}^{мес} = \frac{Q_{FeМБПДП}^{мес} \cdot Fe_{МБП}^{мес}}{100}; \quad (1.2.95)$$

- 2) получили месячный расход железа для печи из рудной части шихты в тоннах суммированием месячного расхода железа из ЖРЧ для печи в тоннах с расходами железа металлдобавок:

$$Q_{Fe,РЧДП}^{мес} = Q_{Fe,ЖРЧ}^{мес} + Q_{Fe,РМаргДП}^{мес} + Q_{Fe,СвШлДП}^{мес} + Q_{Fe,КорДП}^{мес} + Q_{Fe,МБПДП}^{мес}. \quad (1.2.96)$$

Удельные расходы железа из рудной части шихты в кг/т чугуна определили аналогично удельным расходам железа из железорудной части шихты (1.2.91).

Баланс доменного газа по цеху. Баланс доменного газа рассчитывается для определения потерь доменного газа в процентах по отношению к общему его месячному

выходу, а также для определения долей расхода газа каждым из его потребителей. С этой целью из величины общего месячного выхода газа по цеху ($Q_{Г,ЦЕХ}^{мес}$) вычитаются расходы потребителей доменного газа: расход доменного газа на воздухонагреватели доменных печей ($Q_{Г,Возд}^{мес}$); расход доменного газа для наполнения межконусных пространств доменных печей ($Q_{Г,Кон}^{мес}$); расход доменного газа другим цехам ($Q_{Г,ДрЦ}^{мес}$). В итоге потери доменного газа определили по формуле, тыс. м³:

$$Q_{Г,ПотериЦЕХ}^{мес} = Q_{Г,ЦЕХ}^{мес} - Q_{Г,Возд}^{мес} - Q_{Г,Кон}^{мес} - Q_{Г,ДрЦ}^{мес} \quad (1.2.97)$$

Величина потерь доменного газа в процентах составила, %:

$$Q_{Г,ПотериЦЕХ\%}^{мес} = \frac{Q_{Г,ПотериЦЕХ}^{мес}}{Q_{Г,ЦЕХ}^{мес}} \cdot 100. \quad (1.2.98)$$

Процентную долю расхода газа на воздухонагреватели определили, %:

$$\eta_{Г,Возд}^{мес} = \frac{Q_{Г,Возд}^{мес}}{Q_{Г,ЦЕХ}^{мес}} \cdot 100. \quad (1.2.99)$$

Процентная доля расхода газа на наполнение межконусных пространств составила, %:

$$\eta_{Г,Кон}^{мес} = \frac{Q_{Г,Кон}^{мес}}{Q_{Г,ЦЕХ}^{мес}} \cdot 100. \quad (1.2.100)$$

Процентная доля расхода газа другим цехам составила, %:

$$\eta_{Г,ДрЦ}^{мес} = \frac{Q_{Г,ДрЦ}^{мес}}{Q_{Г,ЦЕХ}^{мес}} \cdot 100. \quad (1.2.101)$$

Баланс железа по цеху. Расчет всего количества загруженного в печи железа приведен ранее в разделе «Расход, поступление и остатки сырья, топлива и других ресурсов и их качественные характеристики» см. (1.2.87) –(1.2.96).

Расчет железа в чугунае годном осуществили следующим образом:

- 1) по известному усредненному за месяц химическому анализу чугуна по печи рассчитали содержание железа в чугунае для каждой доменной печи, %:

$$Fe_{чугДП}^{мес} = 100 - [Si] - [Mn] - [S] - [Ti] - [P] - [Cr] - [C], \quad (1.2.102)$$

где [Si], [Mn], [Ti], [P], [Cr], [C] – содержание соответственно кремния, марганца, титана, фосфора, хрома, углерода в чугунае;

- 2) определили количество тонн железа в чугунае годном для каждой доменной печи в месячном производстве, т:

$$Q_{Fe, \text{чуг, ДП}}^{\text{мес}} = \frac{P_{\text{чуг, ДП}}^{\text{мес}} \cdot Fe_{\text{чуг, ДП}}^{\text{мес}}}{100}, \quad (1.2.103)$$

где $P_{\text{чуг, ДП}}^{\text{мес}}$ – производство чугуна за месяц по доменной печи, т.

Расчет потерь железа со шлаком в виде FeO определили следующим образом:

- 1) по расчетному удельному выходу шлака (1.2.24) рассчитали количество шлака по каждой доменной печи за месяц в тоннах:

$$U_{\text{шл, ДП}}^{\text{мес}} = U_{\text{шл, уд, ДП}}^{\text{мес}} \cdot P_{\text{чуг, ДП}}^{\text{мес}}; \quad (1.2.104)$$

- 2) определили потери железа в виде FeO со шлаком в тоннах по каждой доменной печи:

$$\eta_{Fe, \text{шл, ДП}}^{\text{мес}} = \frac{U_{\text{шл, ДП}}^{\text{мес}} \cdot FeO_{\text{шл}}^{\text{мес}}}{100} \cdot \frac{56}{72}, \quad (1.2.105)$$

где $FeO_{\text{шл}}^{\text{мес}}$ – содержание оксида железа в усредненном за месяц анализе шлака по печи, %; 56 и 72 – атомный и молекулярный вес железа и FeO соответственно.

Для определения потерь железа в доменном цехе с ломом и скрапом всех видов ($\eta_{Fe, \text{ЛЧЦЕХ}}^{\text{мес}}$) нужно знать вес лома чугуна и вес скрапа всех видов ($G_{\text{ЛЧЦЕХ}}^{\text{мес}}$), а также содержание чугуна в них ($Fe_{\text{ЛЧЦЕХ}}^{\text{мес}}$). Поскольку в подсистеме технического отчета учитывается только лом чугуна, то и потери железа определяются только с ломом чугуна. Содержание железа в чугунном ломе принимается таким же, как в жидком чугуне.

$$\eta_{Fe, \text{ЛЧЦЕХ}}^{\text{мес}} = \frac{G_{\text{ЛЧЦЕХ}}^{\text{мес}} \cdot Fe_{\text{ЛЧЦЕХ}}^{\text{мес}}}{100}. \quad (1.2.106)$$

Потери железа с сухой колошниковой пылью (СКП) и сухой вентиляционной пылью (СВП) за месяц определили следующим образом, т:

$$\eta_{Fe, \text{СКПЦЕХ}}^{\text{мес}} = \frac{СКП_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}} \cdot Fe_{\text{СКПЦЕХ}}^{\text{мес}}}{100}; \quad (1.2.107)$$

$$\eta_{Fe, \text{СВПЦЕХ}}^{\text{мес}} = \frac{СВП_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}} \cdot Fe_{\text{СВПЦЕХ}}^{\text{мес}}}{100}, \quad (1.2.108)$$

где $СКП_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}}$, $СВП_{\text{ЦЕХ}}^{\text{мес}}$ – соответственно общий вес сухой колошниковой пыли и сухой вентиляционной пыли за месяц по доменному цеху, т; $Fe_{\text{СКПЦЕХ}}^{\text{мес}}$, $Fe_{\text{СВПЦЕХ}}^{\text{мес}}$ – содержание железа соответственно в сухой колошниковой пыли и сухой вентиляционной пыли.

Количество полезно используемого (учтенного) железа в тоннах рассчитали путем сложением всех потерь, определенных по уравнениям (1.2.104) – (1.2.108).

Использование шлака по цеху. Величину полученного огненно жидкого шлака ($U_{\text{ШЛ,ЦЕХ}}^{\text{мес}}$) приняли за 100%. Эта величина включает в себя общую сумму количества шлака в тоннах, отправленного на шлакопереработку ($U_{\text{ШЛ,Перераб}}^{\text{мес}}$, данные АСУ ДЦ) и количество шлака, скачанного в ККЦ ($U_{\text{ШЛ,ККЦ}}^{\text{мес}}$), т.е. попавшего в миксеровозы с чугуном.

$$U_{\text{ШЛ,ЦЕХ}}^{\text{мес}} = U_{\text{ШЛ,Перераб}}^{\text{мес}} + U_{\text{ШЛ,ККЦ}}^{\text{мес}}. \quad (1.2.109)$$

Шлак, отправленный на скардовины, – это шлак, отгружаемый в рудник. Величину его ($U_{\text{ШЛ,Ск}}^{\text{мес}}$) рассчитали по разнице жидкого шлака, отправленного на переработку и шлака, заданного на грануляцию ($U_{\text{ШЛ,Гран}}^{\text{мес}}$), т:

$$U_{\text{ШЛ,Ск}}^{\text{мес}} = U_{\text{ШЛ,Перераб}}^{\text{мес}} - U_{\text{ШЛ,Гран}}^{\text{мес}} \quad (1.2.110)$$

Использование колошниковой пыли. Величину уловленной колошниковой пыли всего по цеху, рассчитанную по уравнению (1.2.35) в тоннах принимаем за 100%. Количество пыли, отправленной на переработку аглофабрикам определяется по уравнению (1.2.34). В данном разделе подсистемы технического отчета необходимо определить процентное содержание данных статей использования колошниковой пыли:

$$\eta_{\text{СКПЦПАШ}}^{\text{мес}} = \frac{\text{СКП}_{\text{ЦПАШ}}^{\text{мес}}}{\text{СКП}_{\Sigma}^{\text{мес}}} \cdot 100, \quad (1.2.111)$$

$$\eta_{\text{СКП,ЦемЗавод}}^{\text{мес}} = \frac{\text{СКП}_{\text{ЦемЗавод}}^{\text{мес}}}{\text{СКП}_{\Sigma}^{\text{мес}}} \cdot 100. \quad (1.2.112)$$

1.2.2. Математическое обеспечение подсистемы модельной поддержки принятия решений, диагностики работы доменных печей и прогнозирования технологических ситуаций

Подсистема модельной поддержки принятия решений АИС АППС ДП включает следующие взаимосвязанные подсистемы более низкого уровня декомпозиции: расчета балансов элементов; газодинамического режима; шлакового режима; теплового режима; диагностики хода доменной плавки и прогнозирования технологических ситуаций.

Подсистема газодинамического режима. Поскольку математическая модель газодинамического режима доменной плавки является относительно сложной для

реализации подсистемы в виде программного модуля, потребовалась более детальная разработка спецификаций отдельных блоков модели. В качестве метода разработки спецификаций использовали диаграммы потоков данных (Data Flow Diagram, DFD), адаптированные для отображения математических зависимостей [20].

Нотация метода DFD предполагает разбиение математической модели на отдельные функциональные компоненты (процессы) и представление их в виде сети, связанной потоками данных. Главная цель использования средства – продемонстрировать, как каждый процесс преобразует свои входные данные в выходные, а также выявить отношения между этими процессами. В соответствии с методологией математическую модель газодинамического режима определим в виде иерархически диаграмм потоков данных, описывающих асинхронный процесс преобразования информации от ее ввода в подсистему до выдачи пользователю. Отдельные процессы декомпозированы до такого уровня, при котором они становятся элементарными, и детализировать их далее невозможно.

Определение газодинамических характеристик в базовом периоде доменной плавки. В основе моделирования процессов газодинамики лежит уравнение Эгона, позволяющее оценить влияние параметров шихты, газа и характера взаимодействия между этими потоками [5,8,11,16,18,22,23]:

$$\Delta P = \lambda \frac{W^2}{2} \rho \frac{H}{d_{\text{Э}}} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{T}{273(1+P_{\Gamma})}, \quad (1.2.113)$$

где λ – коэффициент, учитывающий форму и шероховатость частиц слоя;

W – скорость фильтрации газового потока;

ρ – плотность газа;

H – высота слоя шихты в печи;

$d_{\text{Э}}$ – эквивалентный диаметр куска шихты;

ε – порозность слоя шихты;

T – температура газа;

P_{Γ} – избыточное давление газа.

Нарушение в ходе шихты в печи начинается далеко до полного уравнивания ее газовым потоком. В качестве критерия устойчивости слоя шихты в печи при воздействии на него газового потока принимается степень уравнивания (СУ) шихты газом:

$$CU = \frac{10\Delta P}{H_A \gamma_H^{\text{III}}}, \quad (1.2.114)$$

где $СУ$ – степень уравнивания шихты газовым потоком, доли ед.;

H_A – высота «активной» части слоя шихты (высота слоя шихты от уровня воздушных фурм до уровня шихты в печи), м;

ΔP – перепад давления газов по высоте «активной» части слоя шихты, кг/см² (атм);

γ_H^{III} – насыпная масса шихты, т/м³.

Как показывает практика, при достижении значения $СУ = 55\text{--}60\%$ наступает изменение в ходе шихтовых материалов: вместо плавного движения наступает режим неровного хода материалов с появлением внутри слоя локальных разрыхлений и пустот, в которых развивается явление разделения шихты на отдельные составляющие согласно их крупности и плотности [16]. Таким образом, происходит нарушение установленного при загрузке значения рудной нагрузки (отношение массы рудного материала к массе кокса) с развитием похолодания доменной плавки вследствие прихода в нижнюю часть печи материалов с увеличенной рудной нагрузкой.

Требуется определить зависимости сопротивления слоя шихты в печи от количества дутья, подаваемого в печь в базовом варианте плавки, с дальнейшим определением критических значений перепада давления и соответствующего этому расхода дутья, превышение которых сопровождается нарушением в ходе шихты и снижением технических показателей плавки.

Блок-схема моделирования газодинамического режима представлена на рисунке 1.17.

Задача описания газодинамических закономерностей слоя шихты в печи выполнялась отдельно для нижней и верхней частей слоя шихты.

Моделирование газодинамического режима нижней части (при температуре газа более 1000 °С) осуществляется в следующей последовательности:

- рассчитываются выход, состав горнового газа и теоретическая температура горения;
- рассчитывается состав газа на горизонте 1000 °С. Определяются количество монооксида углерода, получающегося при прямом восстановлении оксидов железа, марганца, кремния, фосфора, а также монооксид углерода, образующийся при процессе десульфурации чугуна. Рассчитывается объем водорода в этом температурном интервале по степени использования водорода, определенной по эмпирическим зависимостям;
- рассчитываются два параметра, определяющие перепад давления в нижней зоне доменной печи, – плотность газа и скорость его фильтрации;



Рисунок 1.17 - Блок-схема моделирования газодинамического режима доменной плавки

- рассчитываются теплоемкость газа и температура в зоне как среднеарифметическое значение между теоретической температурой горения на фурмах и 1000°C;
- при отсутствии измерений нижнего перепада давления газов по высоте слоя шихты он определяется следующим образом:

$$\Delta P_H = \alpha (P_D - P_{КГ}), \quad (1.2.115)$$

где α – доля нижнего перепада давления газов от общего, доли ед.;

P_D – избыточное давление горячего дутья, атм;

$P_{КГ}$ – избыточное давление колошникового газа, атм;

- условно принимается, что температурная граница 1000 °С находится на стыке шахты и распара печи. К высоте нижней зоны печи нужно отнести также верхнюю часть горна (от уровня воздушных фурм до горизонта стыка горна с заплечиками, что составляет примерно 0,5 м). В этом случае высота слоя шихты в нижней зоне печи определится следующим образом:

$$H_{III}^H = h_3 + h_P + 0,5. \quad (1.2.116)$$

Порозность слоя кокса может быть рассчитана, в частности, по эмпирическому уравнению [5,16,22]. Определение входящего в уравнение (1.4) эквивалентного диаметра куска шихты производится согласно гранулометрическому составу шихты:

$$d_{\Sigma} = \frac{100}{\sum \alpha_i / d_i}, \quad (1.2.117)$$

где α_i – содержание i -й фракции в материале, %;

d_i – средний размер i -й фракции, мм.

- рассчитывается скорректированное значение порозности коксовой насадки (с учетом нахождения в межкусковых пространствах кокса шлака), для чего определяются:

1) удельный объем образующегося шлака:

$$V_{шл} = U_{шл} / \rho_{шл}, \quad (1.2.118)$$

где $U_{шл}$ – удельный выход шлака, кг/т чугуна;

$\rho_{шл}$ – плотность шлака, кг/м³;

- 2) объем остающегося в коксовой насадке шлака, который определяется вязкостью шлака – чем она ниже, тем меньше шлака остается в слое кокса, и порозность слоя кокса будет высокой. Напротив, если шлак имеет высокую вязкость, то, оставаясь в коксовой насадке, он снижает порозность слоя кокса в зоне шлакообразования. Это обстоятельство можно учитывать введением коэффициента μ , учитывающего

подвижность шлака. В том случае, когда образовавшийся шлак остается в зоне шлакообразования, значение этого коэффициента равно единице. С другой стороны, при контакте железистого шлака с углеродом коксовой насадки возможно насыщение шлака газом из-за развития реакции $(\text{FeO}) + \text{C}_\text{K} = [\text{Fe}] + \text{CO}$, что превращает шлак в гетерогенную газошлаковую систему с ростом объема шлака. Степень гетерогенности шлакового расплава можно учесть коэффициентом ν , значение которого в зависимости от неблагоприятного развития процессов прямого восстановления оксидов железа может достигать 5–10 [16,20]. С учетом вышесказанного действительный удельный объем шлака в коксовой насадке $V_{\text{шл}}'$ (м³/т чугуна) в общем виде рассчитывается по уравнению

$$V_{\text{шл}}' = V_{\text{шл}} \mu \nu, \quad (1.2.119)$$

где $V_{\text{шл}}$ – удельный объем образующегося шлака, м³/т чугуна;

3) удельный объем кокса на получение 1 тонны чугуна:

$$V_K = \frac{k}{\gamma_H^K}, \quad (1.2.120)$$

где k – удельный расход кокса, кг/т чугуна;

γ_H^K – насыпная масса кокса, кг/м³.

Удельный объем межкусковых пространств коксовой насадки:

$$V_{\text{об}} = V_K \varepsilon_K. \quad (1.2.121)$$

С учетом того, что часть этого объема занята образующимся шлаком, оставшийся удельный объем межкусковых пространств коксовой насадки составляет следующую величину:

$$V_{\text{об}}' = V_{\text{об}} - V_{\text{шл}}'. \quad (1.2.122)$$

В этом случае скорректированное значение порозности коксовой насадки (с учетом нахождения в межкусковых пространствах кокса шлака) можно рассчитать по уравнению

$$\varepsilon_K^B = \frac{V_{\text{об}}^B}{V_K}. \quad (1.2.123)$$

После определения всех параметров шихты и газа, определяющих газодинамическое сопротивление, находится коэффициент сопротивления, являющийся настройкой модели:

$$\lambda = \frac{\Delta P_H}{\frac{W_H^2}{2} \rho_0 \frac{H_{III}^H}{d_{\Xi}^K} \frac{(1 - \varepsilon_{\frac{B}{K}})}{\frac{B}{K}} \frac{(t_H + 273)}{273} \frac{1}{P_H}} \quad (1.2.124)$$

Тогда коэффициент пропорциональности между контролируемым расходом дутья (по прибору в кубометрах в минуту) и скоростью фильтрации газа в нижней зоне доменной печи рассчитывается по уравнению

$$k_H = \frac{V_D}{W_H \overline{S}_H}, \quad (1.2.125)$$

где V_D – измеряемый расход дутья, м³/мин;

\overline{S}_H – среднее значение поперечного сечения нижней зоны печи, м².

Значение коэффициента A в уравнении $\Delta P = f(V_D)$:

$$A_H = \lambda \frac{H_{III}^H}{d_{\Xi}^K} \frac{\rho_0}{2} \left[\frac{1}{\overline{S}_H k_H} \right]^2 \left[\frac{(1 - \varepsilon_{\frac{B}{K}})}{\frac{B}{K}} \right] \left(\frac{t_H + 273}{273} \right) \frac{1}{P_H^H}. \quad (1.2.126)$$

В окончательном виде зависимость сопротивления слоя шихты в нижней части доменной печи с учетом параметров шихты и дутья для базового варианта доменной плавки выражается уравнением следующего вида:

$$\Delta P = A_H V_D^2. \quad (1.2.127)$$

В идеологическом плане определение газодинамического сопротивления слоя шихты в верхней части доменной печи, т.е. в зоне температур ниже 1000°C, принципиально не отличается от расчета сопротивления для нижней зоны.

В верхней зоне объем и состав меняются относительно рассчитанного ранее (в нижней зоне печи) вследствие разложения известняка (если он загружается в печь), а также в результате протекания процессов косвенного восстановления оксидов железа. Предполагается, что количество водорода в зоне температур ниже 1000 °C не изменяется, т.е. водород как восстановитель в низкотемпературных зонах уже не работает. В этом случае

объем водорода $V_{H_2}^{жд}$ в колошниковом газе равен $V_{H_2}^{t=1000}$.

После определения удельного выхода колошникового газа осуществляется расчет скорости фильтрации газового потока в верхней зоне доменной печи.

При расчете газодинамических характеристик слоя шихтовых материалов определяются эквивалентный диаметр куска шихты (d), порозность слоя шихтовых материалов (ε), оценка производится по эмпирическим соотношениям [1,5,16,22].

Насыпная масса загружаемой шихты ($\gamma_n^{\text{ш}}$), т/м³, определяются с учетом объемных долей компонентов шихты: кокса, агломерата, окатышей и т.д.

Перепад давления газов в верхней зоне доменной печи:

$$\Delta P_B = (1 - \alpha) \cdot (P_D - P_{KG}) \quad (1.2.128)$$

Коэффициент сопротивления слоя шихты в верхней зоне доменной печи:

$$\lambda_B = \frac{\Delta P_B}{\frac{W_B^2}{2} \rho_0 \frac{H_B}{d_{\text{Э}}^B} \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{(t_B + 273)}{273} \frac{1}{P_G^B}} \quad (1.2.129)$$

Степень уравнивания шихты газовым потоком находится из уравнения (1.134):

$$CU = 1000(1 - m) \frac{(P_D - P_{KG})}{H_A \cdot \gamma_H^{\text{ш}}}, \quad (1.2.130)$$

где m – потери давления горячего дутья по тракту подачи, доли ед.;

P_D – избыточное давление горячего дутья, ати;

P_{KG} – избыточное давление колошникового газа, ати;

H_A – «активная» высота слоя шихты в печи (высота слоя шихты от уровня воздушных фурм до уровня засыпи, м;

$\gamma_H^{\text{ш}}$ – насыпная масса шихты, т/м³.

Степень уравнивания, равная 55–60%, является настройкой модели, предельной, сверх которой наблюдается переход ровного схода шихты в неровное движение материалов, с появлением в локальных участках шихты газовых полостей и участков с повышенной порозностью, что сопровождается в конечном итоге разделением слоя шихты на отдельные компоненты согласно их крупности и плотности. Критической степени уравнивания шихты газом ($CU_{\text{кр}}$) соответствует определенное значение перепада давления газов по высоте слоя шихты, рассчитываемое по уравнению

$$\Delta P_{KP} = \frac{C U_{KP} H_{AY} \frac{III}{H}}{1000(1-m)} . \quad (1.2.131)$$

Этому значению перепада давления газов соответствует критический минутный расход дутья:

$$V_D^{KP} = \sqrt{\frac{\Delta P_{KP}}{A_H + A_B}} . \quad (1.2.132)$$

Решенная задача газодинамического режима выполнена для базового варианта доменной плавки. Она позволяет найти предельную степень форсировки плавки дутьем для установленных параметров шихты и дутьевого режима.

Решение прогнозных вариантов газодинамического режима доменной плавки

Для определения предельных параметров газодинамического режима плавки при изменившихся параметрах предлагается методика расчета сопротивления слоя шихты потоку газа методом приращений – в сравнении прогнозного периода плавки с базовым. Для этого используется линеаризованное уравнение, полученное из выражения (1.2.113):

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P_B} = \frac{\Delta H}{H_B} - \frac{\Delta d_{\Xi}}{d_{\Xi B}} + \frac{2\Delta W}{W_B^2} - \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_B} \cdot \frac{3-2\varepsilon_B}{1-\varepsilon_B} + \frac{\Delta T}{T_B} - \frac{\Delta m}{m_B} + \frac{\Delta \rho}{\rho_B} , \quad (1.2.133)$$

где ΔP_B , H_B , ... – значение соответствующих параметров в базовом варианте;

$\Delta(\Delta P)$, ΔH , ΔW – изменение соответствующего параметра в прогнозном варианте относительно базового.

Рассмотрим в качестве примера изменение газодинамического сопротивления слоя шихты в прогнозном варианте при колебаниях гранулометрического состава шихтовых материалов. Для решения поставленной задачи необходимы дополнительные данные прогнозного периода, в первую очередь удельные расходы шихтовых материалов (если они меняются в прогнозном периоде). Далее, согласно новому фракционному составу железорудных материалов и кокса, находятся эквивалентные диаметры агломерата, окатышей

и кокса в прогнозном варианте и определяются значения ε_{KP} и ε_{AGLP} . В дальнейшем находятся численные значения порозности слоя шихты и эквивалентного диаметра для верхней зоны слоя в прогнозном варианте. Используя уравнение (1.2.130), значение приращения сопротивления слоя шихты в верхней зоне печи относительно базового варианта плавки составит:

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P_B} = -\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_B} \cdot \left(\frac{3 - 2 \cdot \varepsilon_B}{1 - \varepsilon_B} \right) - \frac{\Delta d_{\text{Э}}}{d_{\text{ЭБ}}^{\text{III}}} \quad (1.2.134)$$

В этом случае общий перепад давления газа при движении через слой шихты при расходе дутья, равном базовому, будет следующим:

$$\Delta P_{\text{ОБЩ}}^{\text{П}} = \Delta P_{\text{ОБЩ}}^{\text{Н}} + \Delta P_{\text{П}}^{\text{В}}. \quad (1.2.135)$$

В дальнейшем определяется скорректированное значение коэффициента АП в уравнении $\Delta P = f(V_{\text{д}})$.

В этом случае зависимость $\Delta P = f(V_{\text{д}})$ для прогнозного периода запишется в виде

$$\Delta P_{\text{ОБЩ}} = A_{\text{П}} \cdot V_{\text{д}}^2. \quad (1.2.136)$$

Аналогичным образом моделируется влияние гранулометрического состава кокса, удельного выхода шлака, параметров комбинированного дутья (расхода природного газа, технологического кислорода), давления колошникового газа, уровня засыпи и других входных конструктивных и режимных параметров на газодинамические параметры плавки.

Подсистема шлакового режима. Моделирование шлакового режима выполняется в целях решения следующих технологических задач [5,7,8,16,23,25,27]:

1. Получение шлака, обладающего надлежащими свойствами в ходе всего процесса шлакообразования, начиная со стадии размягчения, последующей фильтрации первичного шлакового расплава в коксовой насадке и заканчивая получением конечного шлакового расплава.
2. Получение чугуна требуемого химического состава при допустимом содержании в нем серы.
3. Получение шлака, обеспечивающего достаточную газопроницаемость зоны шлакообразования, ровного схода шихты в печи, а также устойчивое тепловое состояние доменной плавки.

При разработке модели подсистемы шлакового режима необходимо учесть, что из многих физико-химических характеристик шлака для технологов наиболее важными являются: температуры начала и конца размягчения железорудных материалов, температурный интервал размягчения, температура плавления шлака и его вязкость в рабочем интервале температур [16,17,20]. В соответствии с этим выполнена декомпозиция подсистемы шлакового режима и выделены следующие ее подсистемы: первичного шлака и конечного шлака.

Первичный шлак – это первый подвижный расплав, образующийся в печи. Основная особенность этого шлака обусловлены тем, что в нем содержится повышенное содержание монооксида железа (не закончены процессы восстановления ЖРМ) и в его образовании не участвует зола кокса. В его состав не входят шлакообразующие флюсы.

Моделирование свойств первичного шлака включает блоки:

- определения температур начала плавления и конца размягчения железорудных материалов, толщины зоны вязкопластичного состояния материалов;
- расчета изменение количества и состава первичного шлака по высоте зоны вязкопластичного состояния материалов;
- расчета изменение вязкости первичного шлака по высоте зоны вязкопластичного состояния материалов.

Структура модели расчета параметров первичного шлака приведена на рисунке 1.18. При расчете состава и выхода первичного шлака:

- 1) предполагалось, что прямое восстановление оксида железа осуществляется при температура выше 1000 С, поэтому содержание монооксида железа при этой температуре (FeO_{III}) определяется степенью прямого восстановления [3,5,7,27];
- 2) учитывалось, что зола кокса и флюсы не участвует в процессах первичного шлакообразования и поэтому в расчете состава и выхода шлака не учитываются;
- 3) использовалось допущение об экспоненциальной зависимости содержания монооксида железа от температуры расплава.

Для расчета температур начала размягчения (плавления) (T_{III}) и расплавления (плавления) (T_p) использовались опубликованные в литературе данные и известные эмпирические уравнения [16,17,20].

$$T = a_0 + a_1(CaO/SiO_2) + a_2MgO - a_3Al_2O_3 - a_4FeO - a_5MnO, \quad (1.2.137)$$

где CaO, SiO₂, ... – содержание соответствующих оксидов в железорудном материале, %;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – эмпирические коэффициенты, различные для температуры начала размягчения и температуры плавления.

При определении температурного интервала зоны вязко-пластичного состояния материалов, толщины вязко-пластичного состояния материалов ($h_{ВП}$) использовались допущения о том, что газодинамическую напряженность зоны вязко-пластичных масс создает

слой железорудных материалов с момента 50%-ной усадки слоя, а также об экспоненциальном изменении температур в пределах нижней ступени теплообмена.

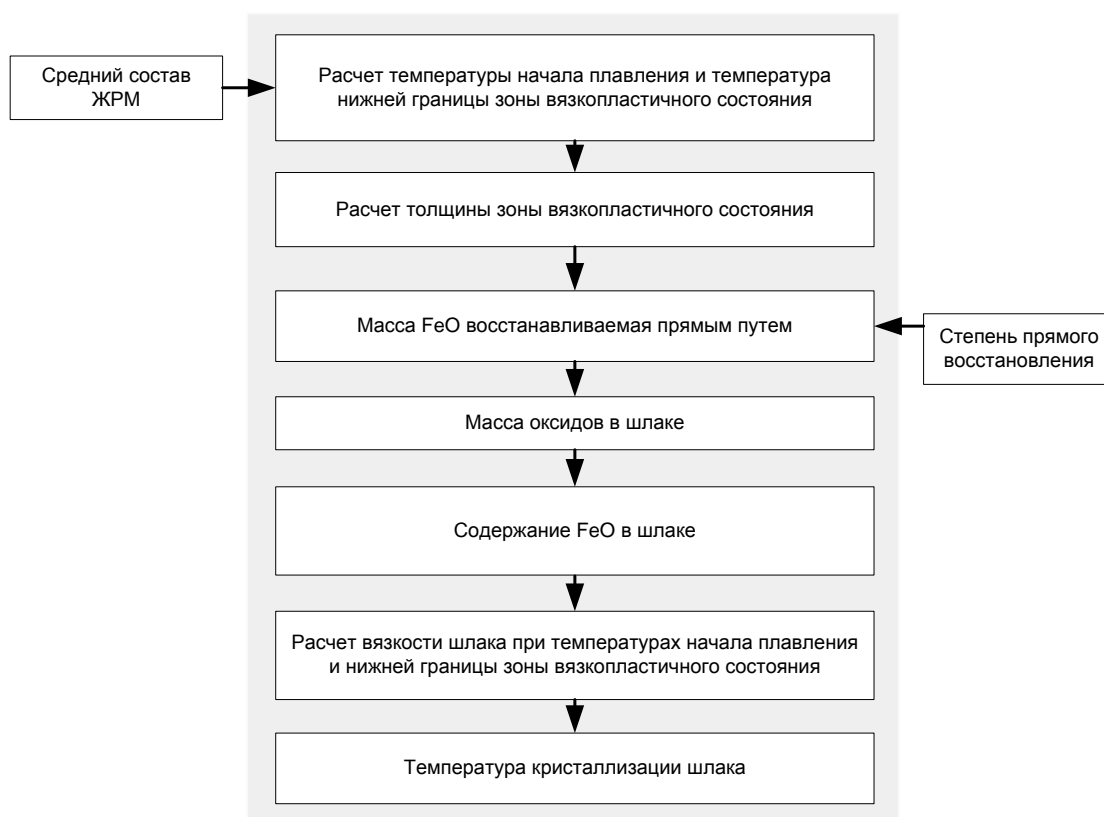


Рисунок 1.18 - Структура модели расчета параметров первичного шлака

Суммарный выход первичного шлака с учетом массы монооксида железа при 1000 С, кг/т чугуна.

$$M_{\text{СУМ}_{\text{ПР}}} = M\text{FeO}_{\text{ПР}} + M\text{CaO} + M\text{SiO}_2 + M\text{Al}_2\text{O}_3 + M\text{MgO} \quad (1.2.138)$$

Содержание монооксида железа при 1000 С, %

$$\text{FeO}_{\text{ПР}} = \frac{M\text{FeO}_{\text{ПР}}}{M_{\text{СУМ}_{\text{ПР}}}} \cdot 100 \quad (1.2.139)$$

Принимаем по данным И.Д.Баллона [20, 25], что содержание монооксида железа при 1000 С составляет, 50% (FeОпро), а содержание монооксида при 1350 С – 3,0 % (FeОкло).

С учетом этого содержание FeO в конечном первичном шлаке при температуре 1350 С равно, %

$$\text{FeO}_{\text{КП}} = \text{FeO}_{\text{ПР}} / \text{FeO}_{\text{ПРО}} \cdot \text{FeO}_{\text{КЛО}} \quad (1.2.140)$$

Масса конечного первичного шлака, кг/т чугуна

$$M_{\text{СУМ}}^K = M_{\text{СУМ}_{\text{ПР}}} \cdot \frac{1 - 0,01 \cdot FeO_{\text{ПР}}}{1 - 0,01 \cdot FeO_{\text{КП}}} \quad (1.2.141)$$

В том числе FeO, кг/т чугуна

$$M_{FeO} = M_{\text{СУМ}}^K - M_{\text{СУМ}} \quad (1.2.142)$$

Предполагая экспоненциальную зависимость концентрации FeO в шлаке от его температуры $t_{\text{шл}}$

$$FeO = FeO_0 \cdot \exp(-e/t_{\text{шл}}) \quad (1.2.143)$$

и зная концентрации FeO при температурах 1000°C и 1350°C. Путем решения системы двух уравнений типа (1.2.143), могут быть найдены значения показателей хода восстановления монооксида железа:

$$\begin{cases} e = \frac{-\ln(FeO_{\text{ПР}}/FeO_{\text{КП}})}{1/1000 - 1/1350}, \\ FeO_0 = FeO_{\text{ПР}} \cdot \exp(e/1000) \end{cases} \quad (1.2.144)$$

Далее по уравнению (1.2.142) рассчитываем содержание FeO при различных температурах.

В дальнейшем осуществляется расчет выхода шлака и массы FeO при различных температурах, кг/т чугуна

$$\begin{aligned} M_{\text{ШЛ}}^{\text{ШЛ}} &= M_{\text{СУМ}_{\text{ПР}}} \cdot \frac{1 - 0,01 \cdot FeO_{\text{ПР}}}{1 - 0,01 \cdot FeO_{\text{КП}}}, \\ M_{FeO} &= M_{\text{СУМ}}^{\text{ШЛ}} - M_{\text{СУМ}} \end{aligned} \quad (1.2.145)$$

Состав первичного шлака, %

$$X = \frac{MX}{M_{\text{СУМ}}} \cdot 100 \quad (1.2.146)$$

где X – содержание соответствующего оксида в шлаке, % ;

MX – масса X оксида в шлаке, кг/т чугуна.

При известных $T_{\text{р}}$ и $T_{\text{нп}}$ температурный интервал плавления ($\Delta t_{\text{пл}}$) железорудных материалов будет:

$$\Delta t_{\text{пл}} = T_{\text{рmax}} - T_{\text{н.пmin}}, \quad (1.2.147)$$

где $T_{\text{рmax}}$ – максимальное значение температуры расплавления из всех применяемых железорудных материалов, °C;

$T_{н.мин}$ – минимальное значение температуры образования первых порций шлака из применяемых для плавки железорудных материалов, °С.

После введения допущения о том, что газодинамическую напряженность зоны вязкопластичных шлаковых масс создает слой железорудных материалов, начиная с момента 50%-ной усадки слоя до момента появления подвижного шлакового расплава (T_p), можно определить скорректированное значение температурного интервала ($\Delta t_{пл}^*$), которое равно:

$$\Delta t_{пл}^* = 0,5 \Delta t_{пл}. \quad (1.2.148)$$

Нижняя граница зоны вязкопластичного состояния равна

$$T_{нг} = t_{н.п.} + \Delta t_{пл}^*. \quad (1.2.149)$$

Температурное поле в пределах нижней ступени теплообмена описывается уравнением следующего вида:

$$\vartheta = \frac{t - t_0}{T_\phi - t_0} = \frac{1 - \exp[(m-1)Y/m]}{1 - m \exp[(m-1)Y_0/m]}, \quad (1.2.150)$$

где

$m = W_M / W_\phi$ – отношение теплоемкостей потоков материалов и газов;

$$m = \frac{W_M}{W_\Gamma} = \frac{T_\phi - T_0}{t_{III} - t_0}; \quad (1.2.151)$$

$Y = \frac{\alpha_v Sh}{W_\Gamma}$ – безразмерная координата по высоте слоя;

$Y_0 = \frac{\alpha_v SH_{BC}}{W_\Gamma}$ – безразмерная высота нижней ступени теплообмена;

$W_\Gamma = c_0^T V_\phi$ – теплоемкость газового потока, Вт/°С;

V_ϕ – выход фурменного газа, м³/с;

c_0^T – среднее значение удельной теплоемкости газа Дж/(м³ °С);

α_v – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³ К);

S – средняя площадь поперечного сечения печи, м²;

H_{BC} – высота верхней ступени теплообмена, м;

h – текущая координата по высоте нижней ступени теплообмена, м;

t_0 – температура материалов в зоне замедленного теплообмена, °C;

T_0 – температура газа в зоне замедленного теплообмена, °C.

T_ϕ – теоретическая температура горения на фурмах, °C;

t_{III} – средняя температура продуктов плавки, °C;

$$t_{III} = \frac{Uc_{шл}t_{шл} + c_q t_q}{Uc_{шл} + c_q}$$

U – выход шлака, кг/т чугуна;

$c_q, c_{шл}$ – теплоемкости чугуна и шлака, кДж/(кг·град);

$t_q, t_{шл}$ – температуры чугуна и шлака, °C.

Полученные данные являются необходимой информацией для оценки высоты слоя вязкопластического состояния материалов.

Для расчета вязкости первичного шлака использовались известные политермы вязкости шлака заданного состава (по данным работы [2,3,10] обозначен как эталонный шлак): содержание FeO = 0%, 6% и 12%, MgO = 10%, Al₂O₃ = 10%, основности шлака CaO/SiO₂=1,0. Эти результаты представлены на рисунке 1.19.

Обработкой политерм вязкости шлака эталонного состава получены уравнения следующей структуры:

$$\eta_{\Sigma} = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5 + a_6 \cdot T^6, \quad (1.2.152)$$

где коэффициенты a_i принимают различные значения при содержании FeO = 0%, 6% и 12%.

Дальнейшая последовательность вычислений сводится к следующему:

1. Первоначально подлежит расчету вязкость эталонного шлака при температурах начала плавления $T_{нп}$ и температуре нижней границы зоны вязкопластического состояния $T_{нг}$ при содержании FeO = 0%, 6% и 12%. по уравнению (1.2.152).

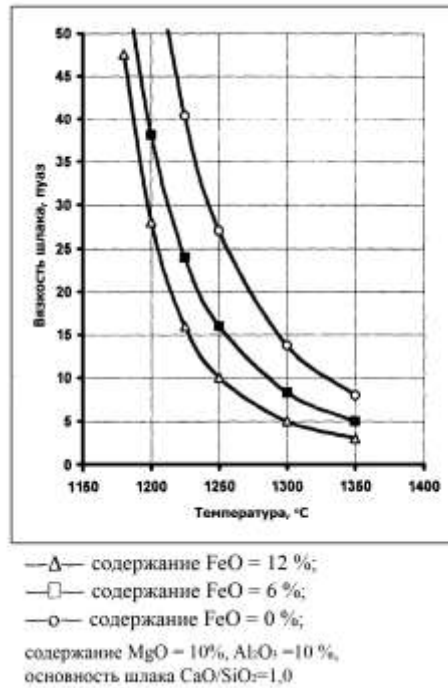


Рисунок 1.19 - Политермы вязкости первичного шлака с различным содержанием FeO

- Затем подбираются коэффициенты уравнения зависимости вязкости шлака при заданной температурах $T_{нп}$ и $T_{нг}$ от содержания FeO

$$\eta = c_0 + c_1 FeO + c_2 FeO^2, \quad (1.2.153)$$

где коэффициенты c_i – зависят от температуры шлака ($T_{нп}$ и $T_{нг}$).

- Далее рассчитывается вязкость шлака при известном содержании монооксида железа на входе в зону плавления (при температуре начала плавления $T_{нп}$) и на выходе из зоны (при температуре нижней границы зоны вязкопластичного состояния $T_{нг}$) по уравнению (1.2.153);
- Вносится поправка на вязкость шлака при отклонении его основности и содержания в нем глинозема от шлака эталонного состава ($CaO/SiO_2=1$ и Al_2O_3).

- Поправка на содержание глинозема Al_2O_3

$$\begin{aligned} \eta_{верх}^{Al_2O_3} &= \eta_{верх} + \alpha_{Al_2O_3} \cdot ((Al_2O_3)_{T_{нп}}) \\ \eta_{низ}^{Al_2O_3} &= \eta_{низ} + \beta_{Al_2O_3} \cdot ((Al_2O_3)_{T_{нг}}), \end{aligned} \quad (1.2.154)$$

где $Al_2O_3_{T_{нп}}$ и $Al_2O_3_{T_{нг}}$ – содержание Al_2O_3 в шлаке при температуре начала плавления $T_{нп}$ и температуре нижней зоны когезии $T_{нг}$, а α и β – эмпирические коэффициенты.

- Поправка на содержание MgO

$$\begin{aligned}\eta_{\text{верх}}^{\text{MgO}} &= \eta_{\text{верх}} + \alpha_{\text{MgO}} \cdot ((\text{MgO})_{T_{\text{НП}}}) \\ \eta_{\text{низ}}^{\text{MgO}} &= \eta_{\text{низ}} + \beta_{\text{MgO}} \cdot ((\text{MgO})_{T_{\text{НГ}}})\end{aligned}\quad (1.2.155)$$

где $\text{MgO}_{T_{\text{НП}}}$ и $\text{MgO}_{T_{\text{НГ}}}$ – содержание MgO в шлаке при температуре начала плавления $T_{\text{НП}}$ и температуре нижней зоны когезии $T_{\text{НГ}}$.

- Поправка на основность шлака $B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$

$$\begin{aligned}\eta_{\text{верх}}^{\text{осн}} &= \eta_{\text{верх}} + \alpha_{\text{осн}} \cdot (B - 1) \\ \eta_{\text{низ}}^{\text{осн}} &= \eta_{\text{низ}} + \beta_{\text{осн}} \cdot (B - 1)\end{aligned}\quad (1.2.156)$$

Известно, что для гомогенных шлаковых расплавов влияние температуры на вязкость шлака описывается уравнением Ле-Шателье, имеющим следующую структуру:

$$\ln(\ln(\eta)) = a + b \cdot T_{\text{шл}}, \quad (1.2.157)$$

где a и b – коэффициенты априорно неизвестные.

При известных значениях вязкости шлака конкретного состава при температурах начала плавления $T_{\text{НП}}$ и температуре нижней границы зоны вязкопластичного состояния $T_{\text{НГ}}$, решая систему уравнений вида (1.2.157), можно получить численные значения коэффициентов a_0 , a_1 и, тем самым конкретизируя уравнение (1.2.157), найти функциональную зависимость вязкости шлака от его температуры.

Коэффициенты политермы вязкости:

$$\begin{aligned}b &= \frac{-\lg(\lg(\eta_{\text{НП}})) - \lg(\lg(\eta_{\text{НГ}}))}{T_{\text{НП}} - T_{\text{НГ}}} \\ a &= \lg(\lg(\eta_{\text{НП}})) - T_{\text{НГ}} \cdot b\end{aligned}\quad (1.2.158)$$

Таким образом, предложенная модель позволяет определить:

- толщину зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов;
- изменение состава первичного шлака ее высоте;
- изменение вязкости по высоте зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов.

Моделирование свойств конечного шлака включает блоки:

- определение выхода, состава и политермы вязкости конечного шлака;
- расчета десульфуризирующей способности шлака и содержания серы в чугуне;
- диагностику шлакового режима.

Структура модели расчета параметров конечного шлака приведена на рисунке 1.20.

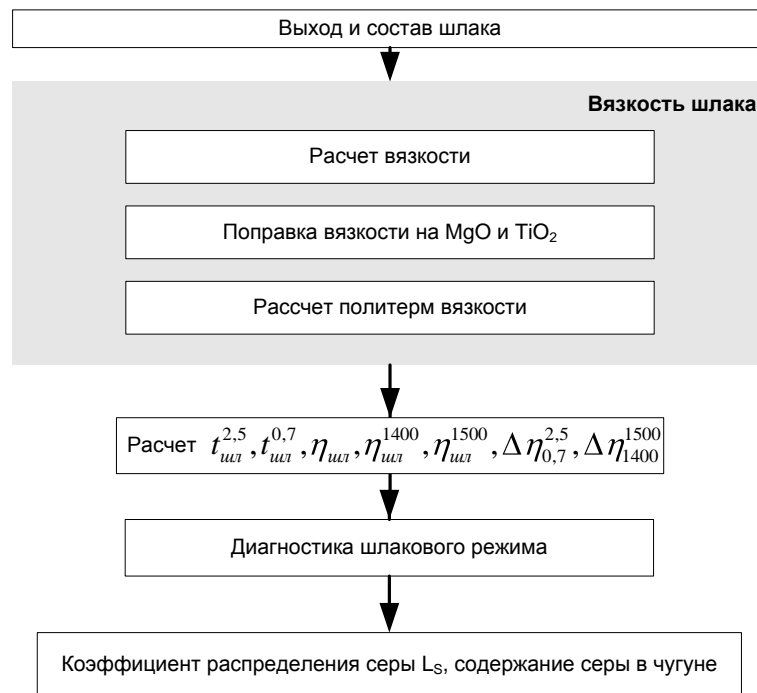


Рисунок 1.20 - Структура модели расчета параметров конечного шлака

В основе расчета выхода и состава шлака (содержание в шлаке CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MgO , TiO_2) лежат уравнения материальных балансов основных химических элементов и их соединений [1,5,7,8,15,16,18,26,27]. Выход шлака рассчитывается по балансу шлакообразующих элементов. В основе аналитического расчета вязкости шлака лежат математическая обработка диаграммы тройной шлаковой системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ при температурах 1400 и 1500°C в области реальных значений доменных шлаков и известная зависимость вязкости гомогенных шлаковых расплавов от температуры [2,5,6,7,10,27]. Предусмотрено введение поправки на содержание в шлаке других оксидов (MgO и др.).

Оценка десульфуризирующей способности шлака и прогнозного содержания серы в чугуне. В основе расчета изменения содержания серы в чугуне лежит баланс серы, который составляется из всех серосодержащих компонентов шихты, шлака и чугуна [5,12,16,]. Отношение коэффициента распределения серы в проектный период (L_S) по отношению к базовому ($L_S^{\bar{}}$) определяется по уравнению, полученному на основании обработки опытных данных работы доменных печей ОАО «ММК» [12,16,19,20]:

$$\lg\left(\frac{L_S}{L_S^{\bar{}}}\right) = a_0 \lg(B/B_{\bar{}}) + a_1(t_{\text{шл}} - t_{\text{шл}}^{\bar{}}) - a_2 \lg(\eta/\eta^{\bar{}}) + a_3 \lg\left(\frac{f_{[\text{S}]} / f_{[\text{S}]}^{\bar{}}}{P_{\text{CO}} / P_{\text{CO}}^{\bar{}}}\right), \quad (1.2.159)$$

где a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 – постоянные коэффициенты, определяемые методом параметрической идентификации по информации о работе печи в базовый период; B – обобщенная основность

шлака (по И.С.Куликову) [12]; $f_{[s]}$ – коэффициент активности серы в чугуна; P_{co} – парциальное давление монооксида углерода в горновом газе; индекс «б» указывает на то что значение параметра рассчитывается по текущей информации для базового периода, а параметр без индекса для проектного периода.

Подсистема теплового режима. Подсистема теплового режима позволяет определить расход кокса (в соответствии с рисунком 1.21). При этом требуемый химический состав чугуна для проектного периода задаётся пользователем.

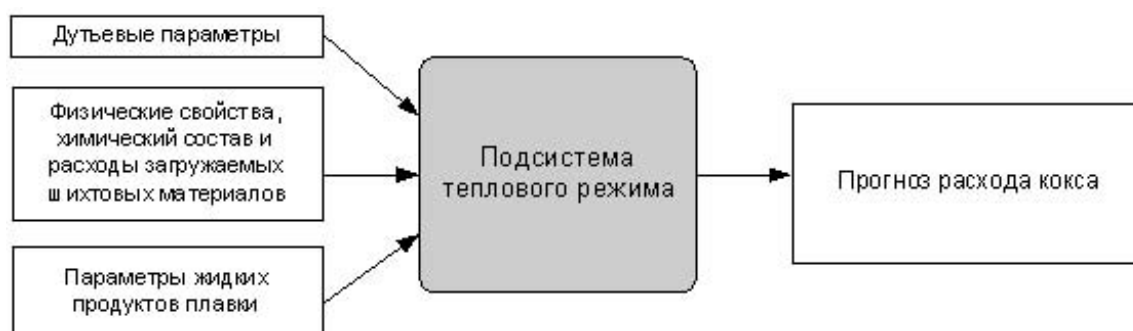


Рисунок 1.21 - Структура подсистемы теплового режима

Производительность доменных печи и удельный расход кокса определяют основные технико-экономические показатели доменной плавки. При моделировании влияния отдельных факторов на эти показатели доменной плавки использовались нормативные коэффициенты подсчета расхода кокса и производительности печи. Методика предназначена для использования при анализе изменений удельного расхода кокса и производительности доменных печей под влиянием изменения технологических параметров плавки. Такой анализ выполняется при сопоставлении периодов работы доменных печей с различными значениями технологических параметров доменной плавки, определяющих величины удельного расхода кокса и производительность. В основе этого анализа лежат количественные соотношения между изменившимися параметрами (факторами) и удельным расходом кокса (производительностью доменных печей), которые определяются либо эмпирически, либо аналитически.

Таким образом, удельный расход кокса и производительность печи для проектного периода определяются по соотношениям

$$K^n = K^{\bar{o}} - \sum_{i=1}^{i=n} a_i (X_i^n - X_i^{\bar{o}}) \quad , \quad (1.2.160)$$

$$P^n = P^{\bar{o}} - \sum_{i=1}^{i=n} b_i (X_i^n - X_i^{\bar{o}}), \quad (1.2.161)$$

где $P^{\bar{o}}, P^n, K^{\bar{o}}, K^n$ – производительность печи (т/сутки) и удельный расход кокса (кг/т чугуна) в базовом и прогнозном периодах;

$X_i^{\bar{o}}, X_i^n$ – соответствующие значения входных параметров в базовом и прогнозном периодах (удельный расход природного газа, температура горячего дутья, содержание железа в рудной части шихты, прочностные характеристики кокса и т.д.);

a_i, b_i – корректировочные коэффициенты, определяемые из модели доменного процесса или нормативно-справочной информации [1,5,8,11,13,16,18,23,27].

Именно такой подход используется при моделировании влияния физико-химических свойств железорудного сырья, кокса, дутьевых параметров на расход кокса и производительность.

1.2.3. Математическое обеспечение подсистемы оптимального распределения топлива - энергетических ресурсов в комплексе доменных печей

Оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов, в частности инжектируемого топлива, в пределах группы доменных печей является актуальной задачей, поскольку технологические показатели работы отдельных печей существенно различаются. При заданном на доменный цех общем расходе инжектируемого топлива целесообразно иметь оперативную методику оценки эффективности использования указанных ресурсов на доменных печах и осуществлять их оптимальное распределение. Эта задача актуальна для крупных доменных цехов, включающих до 8–10 доменных печей, выплавляющих в сутки до 30 тыс. тонн чугуна, для чего используется около 45 тыс. тонн железорудного сырья, 13 тыс. тонн кокса, 3,5 млн. м³ технологического кислорода, до 4,0 млн. м³ природного газа. Эффективность применения комбинированного дутья определяется факторами теплоэнергетического, технологического, экономического характера и внешними условиями. Наличие многих факторов и критериев, определяющих эффективность использования комбинированного дутья, а также ограничений на расходы топливно-энергетических ресурсов существенно усложняет задачу по определению оптимальных параметров дутья, при которых достигаются наилучшие технико-экономические показатели работы, как отдельных доменных печей, так и группы печей или цеха в целом. При построении оптимизационных моделей

необходимо учитывать дополнительные ограничения, которые могут возникать в периоды осенне-зимних похолоданий, когда из-за падения давления в заводском газопроводе нет возможностей подать природный газ в доменную печь или, наоборот, появляются «излишки» природного газа. Поэтому необходимо иметь формализованные и запланированные приемы надежного и маневренного перераспределения топливно-энергетических ресурсов.

При постановке и решении задач оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов требуется не только изучение статических характеристик, описывающих влияние изменений условий плавки на технико-экономические показатели работы печей, но и выполнение детального анализа для математического описания как внешних, так и внутренних ограничений. Кроме того, на практике приходится оценивать техническое состояние печи и оборудования, объем расходов природного газа, качество сырья и другие факторы, которые учитываются только методом экспертных оценок. Поскольку общее количество топливно-энергетических ресурсов (мощность источников) задано, то эти рекомендации должны учитывать и общий лимит ресурсов, выделяемый цеху.

Используемый подход базируется на следующих положениях: в случае чрезвычайной сложности исходной задачи, необходимости учета большого числа нелинейных ограничений типа неравенств, при относительно небольших колебаниях параметров относительно базовых значений целесообразно использовать принцип малых отклонений и свести задачу оптимизации к линейному математическому программированию. При таком подходе имеется возможность в исходной постановке в значительно большей степени учесть технологические особенности функционирования каждого агрегата в отдельности, однако при этом необходимо оценить погрешности линеаризации модели оптимизируемой системы.

Постановка задачи оптимального распределения природного газа в группе доменных печей проиллюстрирована на рисунке 1.22. Последовательность решения задачи оптимизации распределения природного газа отражена в схеме на рисунке 1.23, где очевидны назначение и функции отдельных этапов.

Особенность решения сложных задач математического программирования связана с тем, что в процессе решения могут возникнуть такие случаи, когда ограничения, наложенные на работу цеха в целом, или технологические ограничения на работу отдельных печей противоречивы, т.е. отсутствует область допустимых решений. В связи с этим в алгоритме решения предусмотрен этап анализа решения задачи. В случае отсутствия области решения задачи и противоречивости условий приходится воспользоваться этапом коррекции, т.е. оценить корректность ограничений, надежность исходной информации и т.д.

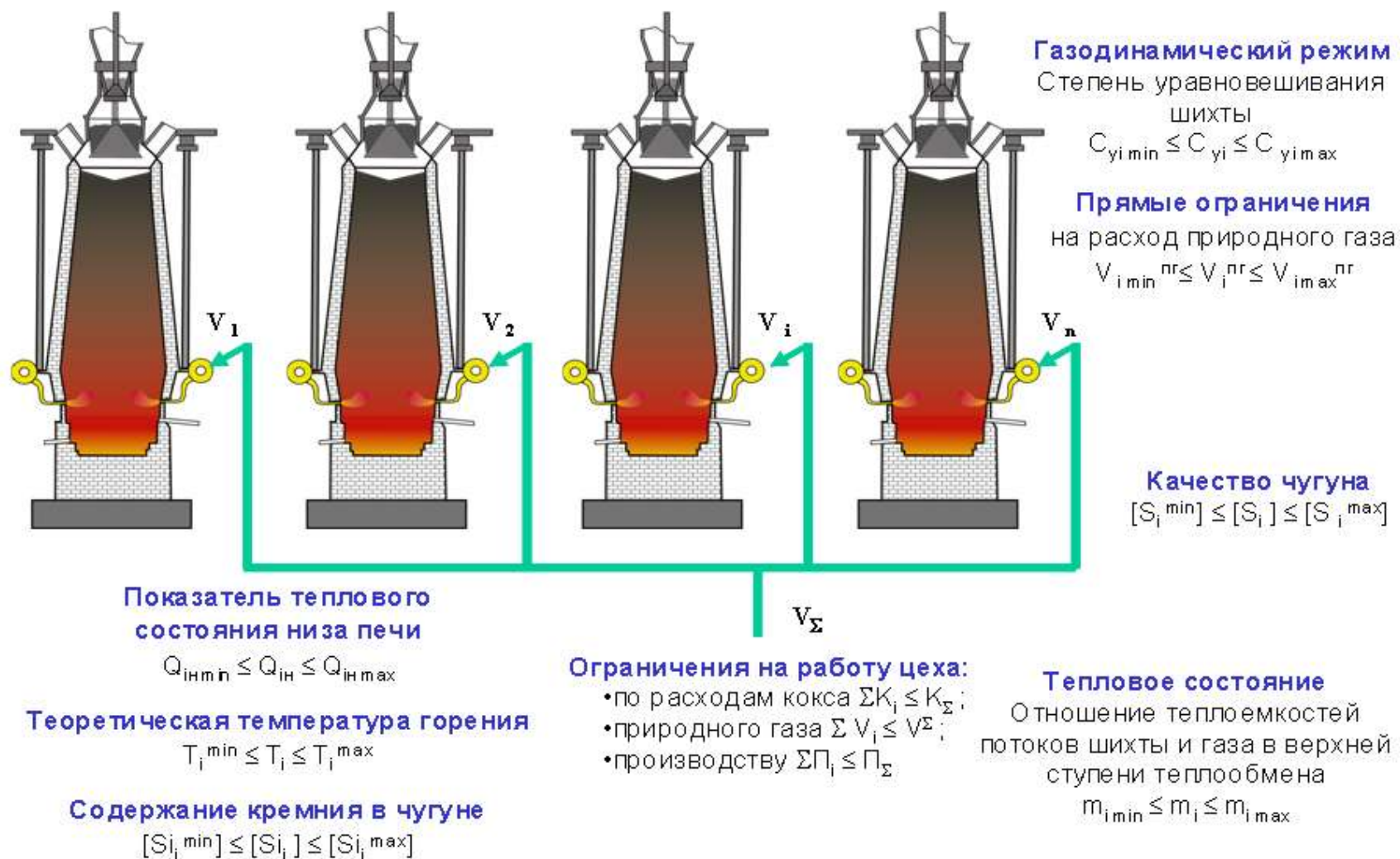


Рисунок 1.22 - К постановке задачи распределения природного газа в группе доменных печей

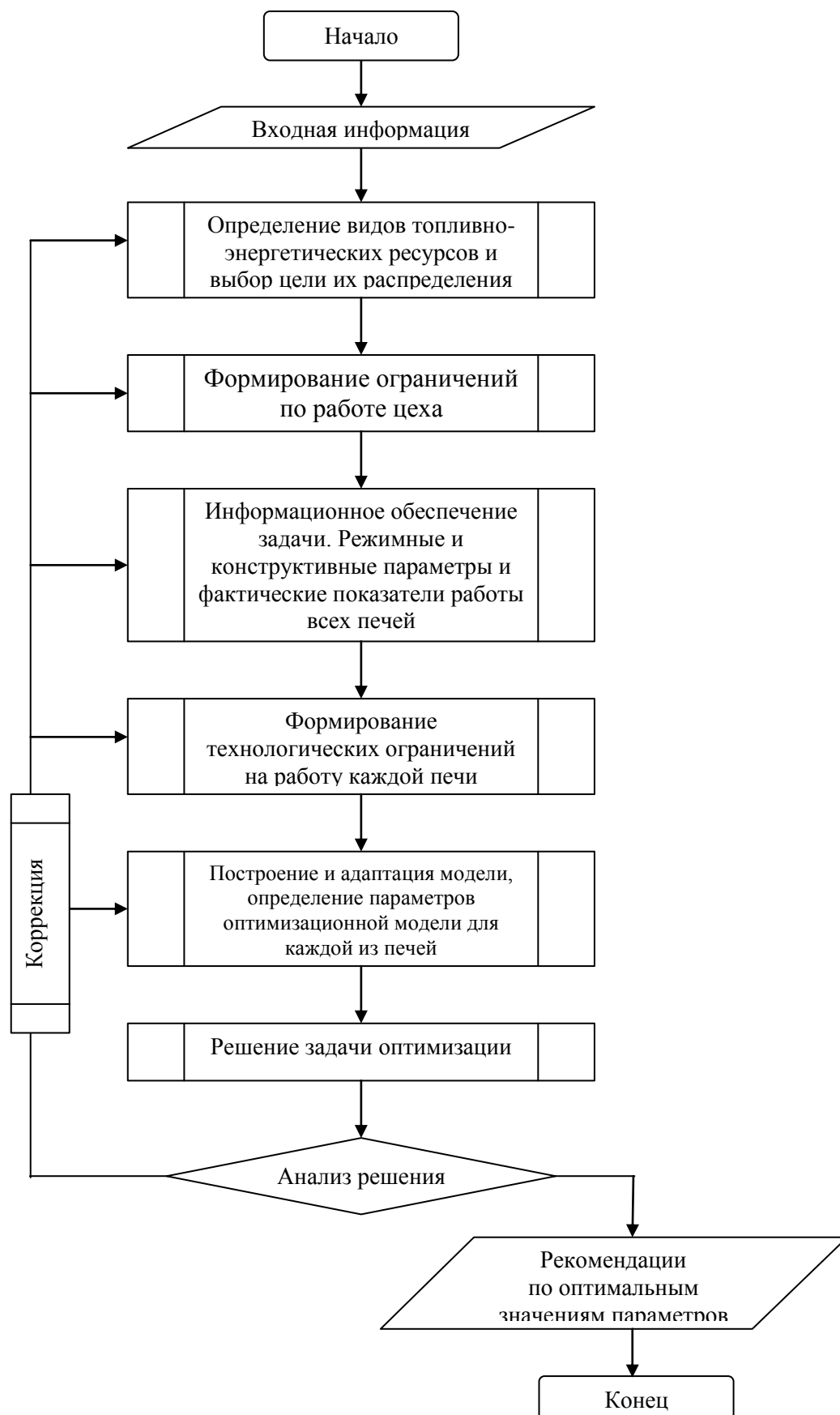


Рисунок 1.23 - Последовательность решения задачи оптимизации распределения природного газа

В связи с этим важным этапом решения задачи является формирование технологических ограничений на работу каждой из печей цеха, предусматривающих учет и математическое описание ограничений на тепловой, дутьевой, газодинамический и шлаковый режимы плавки при выполнении рекомендаций по распределению природного газа. Оценим возможность использования линеаризованных оптимизационных моделей для решения задач распределения природного газа. Применение для решения задачи оптимизации метода линейного программирования связана, в конечном счете, с составлением и решением уравнения следующего типа:

$$\Delta Y_{AB} = \sum (K_i (X_i^B - X_i^A)), \quad (1.2.162)$$

где ΔY_{AB} – изменение показателя процесса в период В относительно периода А;

K_i – коэффициент пересчета показателя процесса для i -го режимного параметра; X_i^B , X_i^A – значения i -го технологического параметра в периоды А и В.

При этом коэффициенты пересчета показателей плавки во всем диапазоне изменения режимных параметров $(X_i^B - X_i^A)$ принимают постоянными.

В качестве обобщенного показателя нелинейности доменного процесса используется следующий коэффициент:

$$K_n = I (I \Delta Y_{BA} / \Delta Y_{AB} I - 1) I \cdot 100, \quad (1.2.163)$$

где K_n – коэффициент нелинейности процесса, %;

ΔY_{AB} , ΔY_{BA} – модельные оценки изменения показателя процесса, $\Delta Y_{AB} = \sum (K_i^A (X_i^B - X_i^A))$; $\Delta Y_{BA} = \sum (K_i^B (X_i^A - X_i^B))$;

K_i^A , K_i^B – коэффициенты пересчета показателя процесса для i -го режимного параметра, полученные с использованием данных о работе доменной печи в периоды А и В. Результаты расчета показателей нелинейности при помощи модели доменной печи и информации о работе доменных печей ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) для характерных периодов приведены в **табл. 1.2.1**.

В рамках описанного подхода были рассчитаны значения коэффициента нелинейности удельного расхода кокса при изменении каждого из режимных параметров доменной плавки для условий работы доменных печей № 4, 6 ОАО ММК (**табл. 1.2.2**). Данные этой таблицы характеризуют нелинейность рассматриваемого показателя и подтверждают ее зависимость от условий плавки.

Таблица 1.2.1 - Данные об изменениях режимных параметров работы доменных печей
и значения коэффициента нелинейности

Номер печи	Период, год		ΔFe , %	$\Delta \omega$, %	$\Delta V_{\text{пг}}$ м ³ /т чугуна	$\Delta t_{\text{д}}$, °C	$\Delta K_{\text{отч}}$, кг/т чугуна	ΔK_{AB} , кг/т чугуна	ΔK_{BA} , кг/т чугуна	$K_{\text{н}}$, %
	А	В								
3	1997	1998	0,7	0,0	-2,5	-71	5,04	5,99	-5,73	4,34
3	1998	1999	-0,2	0,1	-2,2	16	4,14	4,38	-4,47	2,05
3	1997	1999	0,5	0,1	-4,7	-55	9,18	6,64	-6,36	3,92
5	1997	1998	0,7	0,2	-7,0	34	-10,9	-12,57	12,38	1,48
5	1997	1998	0,8	0,6	-3,5	5,0	-7,53	-8,73	8,82	1,03
10	1997	1998	0,1	0,2	3,6	33	-5,60	-6,36	6,19	2,74
10	1998	1999	0,1	0,3	-12,0	42	4,6	4,93	-4,85	1,62

Примечания: ΔFe – изменение содержания железа в железорудной части шихты;

$\Delta \omega$ – изменение содержания кислорода в дутье;

$\Delta V_{\text{пг}}$ – изменение расхода природного газа;

$\Delta t_{\text{д}}$ – изменение температуры горячего дутья;

$\Delta K_{\text{отч}}$ – изменение расхода кокса по отчетным данным;

ΔK_{AB} , ΔK_{BA} – модельные оценки изменения расхода кокса, полученные с использованием данных о работе доменной печи в периоды А и В.

Таблица 1.2.2 - Коэффициенты нелинейности удельного расхода кокса

Область изменения режимных параметров	Доменные печи	
	№ 4	№ 6
Расход природного газа, $\pm 10 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна	1,14	1,37
Содержание кислорода в дутье, $\pm 1,0 \%$	10,37	10,26
Температура дутья, $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$	0,87	0,92

Из приведенных данных следует, что при колебаниях расхода природного газа в пределах $\pm 25 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна, содержания кислорода в дутье в пределах $\pm 0,5 \%$ коэффициент нелинейности изменяется не более чем на 4–5 %. Дальнейший анализ нелинейности доменного процесса позволил установить пределы изменения режимных параметров, в которых допустимо использование линеаризованных моделей. Применительно к условиям работы доменных печей ОАО ММК область применения линеаризованных моделей не превышает допустимой погрешности (5 %) при изменении одного из режимных параметров плавки – расхода природного газа до 30 – 35 $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна. Эти обстоятельства позволяют в дальнейшем использовать линеаризованные модели доменного процесса, поскольку, как показывает практика и подтверждают дальнейшие расчеты, колебания режимных параметров печей при перераспределении природного газа на работающих печах цеха ниже указанных пределов.

Таким образом, в целях повышения надежности оценок в модели использованы соотношения в приращениях, позволяющие свести задачу к задаче линейного математического программирования и исключить влияние инструментальных и систематических погрешностей информационных каналов.

Математическая модель

Анализ нелинейности доменного процесса показал, что при решении задач оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов, в силу относительно небольшого отклонения параметров от базового состояния, достаточно использовать линеаризованные зависимости [16,19-21].

Оптимизационная модель в общем случае сводится к следующему.

Целевая функция

$$Z = \sum_{i=1}^n \{ \alpha (e_i C_k - C_{\text{пр}}) + (1 - \alpha) C_{\text{п}} [\Delta \Pi_i^{\text{пр}} - e_i \Delta \Pi_i^{\text{к}}] \} V_i^{\text{пр}} \rightarrow \max, \quad (1.2.164)$$

где Z – эффективность использования природного газа по цеху, руб./ч;

n – число печей в рассматриваемой группе (цехе);

α – весовой коэффициент, $0 < \alpha \leq 1$;

e_i – эквивалент замены кокса, кг кокса /м³ природного газа;

C_k – стоимость кокса, руб./кг кокса;

$C_{\text{п}}$ – условно-постоянный коэффициент, руб./т чугуна;

$\Delta \Pi_i^{\text{пр}}$ – изменение производительности, т чугуна/м³ природного газа;

$\Delta \Pi_i^{\text{к}}$ – изменение производительности печи, т чугуна/кг кокса;

$V_i^{\text{пр}}$ – расход природного газа, м³/ч.

Ограничения в целом по цеху

По расходу природного газа

$$\sum_{i=1}^n V_i^{\text{пр}} \leq V_{\text{пр}}^{\Sigma}, \quad (1.2.165)$$

где $V_{\text{пр}}^{\Sigma}$ – ресурс цеха по природному газу, м³/ч.

По расходу кокса

$$\sum_{i=1}^n \{ K_{0i} + 0,001 (V_{i0}^{\text{пр}} - V_i^{\text{пр}}) e_i \} \leq K_{\Sigma}, \quad (1.2.166)$$

где K_{0i} – расход кокса на печь, т/ч;

K_{Σ} – резерв по коксу цеха, т/ч;

$V_{i0}^{\text{пр}}$ – расход природного газа на печь в базовом периоде, м³/ч.

По объему производства чугуна

$$\sum_{i=1}^n \{ (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^{\text{к}} + \Pi_{i0} \} \geq \Pi_{\Sigma}, \quad (1.2.167)$$

где Π_{Σ} – требуемое производство чугуна в цехе, т/ч;

Π_{i0} – производительность i -й печи, т/ч.

Таким образом, в самом общем виде постановка задачи оптимизации в доменном цехе предусматривает учет следующих ограничений на работу цеха:

- объем выделенного цеху природного газа $V_{\text{пр}}^{\Sigma}$;
- плановое (требуемое) производство чугуна Π_{Σ} ;
- имеющиеся в распоряжении цеха ресурсы по расходу кокса K_{Σ} .

В процессе решения задачи возможна ситуация, когда цех не может полностью или частично эффективно использовать все указанные ресурсы, тогда часть (или даже все) ограничений, указанных выше, могут оказаться несущественными и они могли бы не учитываться в процессе решения. Однако это не очевидно и становится ясным только после выполнения процедуры решения.

Технологические ограничения на каждую из печей цеха

При выборе основных ограничений на тепловое состояние доменной печи использовались физическое обоснование и классификация лимитирующих факторов при инжекции топлив в доменные печи, представленные в работах Б.И. Китаева и его учеников[11,16,19].

В общем случае технологические условия, ограничивающие применение природного газа, сводятся к следующему:

- обеспечение достаточного количества тепла в нижней и верхней ступенях теплообмена;
- обеспечение полной конверсии природного газа в районе фурменных очагов;
- стабилизация газодинамического режима слоя шихтовых материалов;
- обеспечение высокой степени использования восстановительного потенциала монооксида углерода и водорода;
- получение чугуна требуемого химического состава с допустимым содержанием в нем серы.

В качестве параметров, характеризующих тепловое состояние печи, приняты:

1) обобщенный показатель теплового состояния низа печи (индекс низа):

$$Q_{\text{ни}}^{\min} \leq \{ (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta Q_{\text{ин}}^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta Q_{\text{ин}}^{\text{к}} + [\Delta \Pi_i^{\text{пр}} (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^{\text{к}}] \Delta Q_{\text{ин}}^{\text{п}} + Q_{\text{ин}0} \} \leq Q_{\text{ни}}^{\max}, \quad (1.2.168)$$

где $Q_{\text{ни}}^{\min}$ – минимально допустимое значение индекса низа, МДж/т чугуна;

$\Delta Q_{\text{ин}}^{\text{пр}}$ – приращение теплового состояния низа печи при увеличении расхода природного газа на $\text{м}^3/\text{ч}$, т.е. МДж/т чугуна/ $(\text{м}^3/\text{ч})$;

$\Delta Q_{\text{ин}}^{\text{к}}$ – приращение теплового состояния низа печи при увеличении расхода кокса на кг кокса/ч, т.е. МДж/т чугуна/(кг кокса/ч);

$\Delta Q_{\text{ин}}^{\text{п}}$ – приращение теплового состояния низа печи при увеличении производительности печи на $\text{т}/\text{ч}$, т.е. МДж/т чугуна/(т чугуна/ч);

$Q_{\text{ин}0}$ – индекс теплового состояния низа печи в базовом режиме, МДж/т чугуна;

$Q_{\text{ни}}^{\max}$ – максимально допустимое значение индекса низа печи, МДж/т чугуна;

2) теоретическая температура горения на фурмах:

$$T_i^{\min} \leq (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta T_i^{\text{пр}} + T_i^0 \leq T_i^{\max}, \quad (1.2.169)$$

где T_i^{\min} , T_i^{\max} – минимально и максимально допустимые значения теоретических температур горения, °C;

$\Delta T_i^{\text{пр}}$ – изменение теоретической температуры горения при увеличении расхода природного газа на печи на $\text{м}^3/\text{ч}$, т.е. °C/ ($\text{м}^3/\text{ч}$);

T_i^0 – теоретическая температура горения на i -й печи в базовом периоде, °C;

3) содержание кремния в чугунах:

$$Si_i^{\min} \leq (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta Si_i^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta Si_i^{\text{к}} + [\Delta \Pi_i^{\text{пр}} (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^{\text{к}}] \Delta Si_i^{\text{п}} + Si_{i0} \leq Si_i^{\max}, \quad (1.2.170)$$

где Si_i^{\min} , Si_i^{\max} – минимально и максимально допустимые содержания кремния в чугунах, %;

$\Delta Si_i^{\text{пр}}$ – приращение содержания кремния в чугунах (в процентах) при увеличении расхода природного газа на $\text{м}^3/\text{ч}$;

$\Delta Si_i^{\text{к}}$ – приращение содержания кремния в чугунах (в процентах) при увеличении расхода кокса на $\text{кг}/\text{ч}$;

$\Delta Si_i^{\text{п}}$ – приращение содержания кремния в чугунах (в процентах) при увеличении производительности печи на $\text{т}/\text{ч}$;

Si_{i0} – содержание кремния в чугунах в базовом периоде, %;

4) отношение теплоемкостей потоков шихты и газа в верхней ступени теплообмена:

$$m_i^{\min} \leq (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta m_i^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta m_i^{\text{к}} + [\Delta \Pi_i^{\text{пр}} (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^{\text{к}}] \Delta m_i^{\text{п}} + m_{i0} \leq m_i^{\max}, \quad (1.2.171)$$

где m_i^{\min} , m_i^{\max} – минимально и максимально допустимые значения отношения теплоемкостей потоков;

$\Delta m_i^{\text{пр}}$ – изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении расхода природного газа на $\text{м}^3/\text{ч}$;

$\Delta m_i^{\text{к}}$ – изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении расхода кокса на $\text{кг}/\text{ч}$;

$\Delta m_i^{\text{п}}$ – изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении производительности печи на $\text{т}/\text{ч}$;

m_{i0} – отношение теплоемкостей потоков на печи в базовом режиме;

5) учет полноты конверсии природного газа и газодинамического режима доменной плавки сводится к следующему:

прямые ограничения на расход природного газа на каждую из печей цеха:

$$V_{i\min}^{\text{пр}} \leq V_i^{\text{пр}} \leq V_{i\max}^{\text{пр}}, \quad (1.2.172)$$

где $V_{imin}^{пр}$, $V_{imax}^{пр}$ – соответственно минимально и максимально допустимые расходы природного газа, м³/ч;

степень уравнивания шихты:

$$C_{yi}^{min} \leq (V_i^{пр} - V_{i0}^{пр}) \Delta C_{yi}^{пр} - e_i (V_i^{пр} - V_{i0}^{пр}) \Delta C_{yi}^k + C_{yi0} \leq C_{yi}^{max}, \quad (1.2.173)$$

где C_{yi}^{min} , C_{yi}^{max} – соответственно минимально и максимально допустимые степени уравнивания шихты;

$\Delta C_{yi}^{пр}$ – изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода природного газа на м³/ч;

ΔC_{yi}^k – изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода кокса на кг/ч;

C_{yi0} – степень уравнивания шихты в базовом периоде;

б) качество выплавляемого чугуна оценивается по содержанию серы в чугуне:

$$S_i^{min} \leq (V_i^{пр} - V_{i0}^{пр}) \Delta S_i^{пр} - e_i (V_i^{пр} - V_{i0}^{пр}) \Delta S_i^k + [\Delta \Pi_i^{пр} (V_i^{пр} - V_{i0}^{пр}) - e_i (V_i^{пр} - V_{i0}^{пр}) \Delta \Pi_i^k] \Delta S_i^n + S_{i0} \leq S_i^{max}, \quad (1.2.174)$$

где S_i^{min} , S_i^{max} – соответственно минимально и максимально допустимые содержания серы в чугуне, %;

$\Delta S_i^{пр}$ – приращение содержания серы в чугуне (в процентах) при увеличении расхода природного газа на м³/ч;

ΔS_i^k – приращение содержания серы в чугуне (в процентах) при увеличении расхода кокса на кг/ч;

ΔS_i^n – приращение содержания серы в чугуне (в процентах) при увеличении производительности печи на т/ч;

S_{i0} – содержание серы в чугуне на данной печи в базовом периоде, %.

Следовательно, в отличие от известных работ, в данной постановке в значительно большей степени учтены ограничения по тепловой работе «верха» (m) и «низа» (Q_n , T) печи, химическому нагреву (содержание в чугуне Si), качеству чугуна (содержание в чугуне S), газодинамическим характеристикам работы печи (C_y). При этом предельно допустимые значения величин, т.е. численные значения параметров $V_{imin}^{пр}$, $V_{imax}^{пр}$, Q_{nmax} , Q_{nmin} , T_{imax} , T_{imin} , Si_{imax} , Si_{imin} , m_{imax} , m_{imin} , Si_{imax} , Si_{imin} , C_{yimin} , C_{yimax} , определяются методом экспертных оценок, что позволяет осуществлять настройку модели на реальный процесс путем формализации опыта инженерно-технического и технологического персонала.

В математическом плане решение задач оптимального распределения технологического кислорода и природного газа не вызывает затруднений, поскольку сегодня имеется богатый выбор

инструментальных средств решения задач линейного математического программирования (системы MS Excel, MatLAB, Visual Fortran, MathCAD, Maple, Mathematica и другие).

Разработанная модель позволяет решать задачи оптимального распределения расхода природного газа в следующих технологических ситуациях:

- при сохранении объема ресурсов по расходу природного газа для цеха в целом на постоянном уровне;
- при изменении объема ресурсов по расходу природного газа для цеха в целом;
- для определения максимального объема ресурсов комбинированного дутья, которое может использовать комплекс доменных печей;
- при изменении ресурса по объему кокса, имеющегося в распоряжении цеха;
- при изменении требований задания на объем выплавляемого чугуна комплексом доменных печей;
- при изменении конъюнктуры рынка, т.е. требований обеспечения максимума экономии кокса, обеспечения максимума производства, экономичности работы комплекса печей, цен на топливно-энергетические ресурсы и т.п.;
- в случае изменения режимных и конструктивных параметров печей, входящих в рассматриваемую группу.

Определение коэффициентов оптимизационной модели включает в себя решение следующих задач:

- оценка состояния каждой из доменных печей в базовый период в целях адаптации оптимизационной модели к конкретным условиям печи;
- расчет изменения параметров плавки и характеристик теплового, газодинамического, шлакового режимов при последовательном варьировании расходов кокса, природного газа на каждой из печей цеха (прогноз показателей) при постоянстве остальных входных параметров и отсутствии требований, предъявляемых к химическому составу продуктов плавки, физическим характеристикам шлака и т.п.

В итоге определяются коэффициенты, входящие в левые части матрицы ограничений [см. уравнения (1.2.165) – (1.2.167)] и в целевую функцию [уравнение (1.2.164)]. В качестве примера рассмотрим фрагмент решения задачи оптимального распределения природного газа между доменными печами. Целью распределения природного газа являлось достижение максимальной экономии кокса по цеху за счет инжекции природного газа ($\alpha = 1$).

Таким образом, оптимизация распределения расхода природного газа в ряде случаев сопровождается значительной коррекцией параметров комбинированного дутья. При наличии соответствующего математического и программного обеспечения инженерно-технический

персонал сможет периодически оперативно прогнозировать (уточнять) степень оптимальности параметров комбинированного дутья и при необходимости вносить необходимые коррективы.

1.3. Разработка программных приложений для решения задач управления комплексом доменных печей

Создание программных приложений произведено с учетом требований инженерно-технологического персонала и особенностей использования комплекса анализа и прогнозирования производственных ситуаций в практике работы доменного производства.

1. Комплекс должен решать несколько связанных задач, направленных, в конечном итоге, на повышение эффективности доменной плавки: сбор и формирование отчетных данных о работе доменных печей, мониторинг отчетных параметров, сопоставительный анализ работы доменных печей в различные периоды плавки, модельная поддержка принятия решений по управлению газодинамическим и шлаковым режимами, прогнозирование технологических ситуаций и диагностика работы доменных печей. Учитывая относительно большие масштабы потребления сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, а также выпуска продукции доменного цеха, существенно возрастают риски от принятия необоснованных, неправильных управленческих решений, поэтому применение данного комплекса в доменном производстве имеет несомненные преимущества и приносит положительный эффект от его использования.

2. Инженерно-технологический персонал доменного цеха с помощью программного комплекса должен иметь возможность оперативно производить анализ работы металлургических агрегатов, оценивать текущее состояние хода технологического процесса, производить изучение и анализ наметившихся отклонений ключевых показателей, выявлять причины, повлекшие эти отклонения и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности металлургического производства.

3. Программный комплекс необходимо интегрировать в информационную структуру предприятия, обеспечить в процессе эксплуатации взаимодействие с другими программно-аппаратными информационными системами комбината. Поэтому использование некоторых функций системы требует административного управления и выполнения задач по расписанию, например функция сбора производственных данных и подготовки отчетных документов за истекший период.

4. Важным требованием при разработке комплекса является простота и удобство в использовании, поскольку его применение рассчитано на широкий круг пользователей, от которых не требуется специальных знаний в области информационных технологий. Он должен быть снабжен достаточно полной и понятной различным категориям пользователей документацией, специальное руководство для специалистов по сопровождению, а также набор руководящих документов по обучению работе с программой.

Поскольку проект является достаточно объемной системой, то для его реализации была использована система контроля версий и система автоматической сборки, в комплект которой входит Веб сервер, отображающий информацию по сборкам проекта. Необходимо отметить, что система автоматической сборки помимо компиляции проекта выполняет его модульное тестирование и формирует отчет, который можно посмотреть на Веб сервере. Также использовался сервер автоматических обновлений, устанавливающий у пользователей новую версию программного продукта. На рисунке 1.24 показана общая схема процесса разработки программного обеспечения [20].

Далее приводится описание функциональных возможностей всех подсистем программного комплекса инженерно технологического персонала доменного цеха.

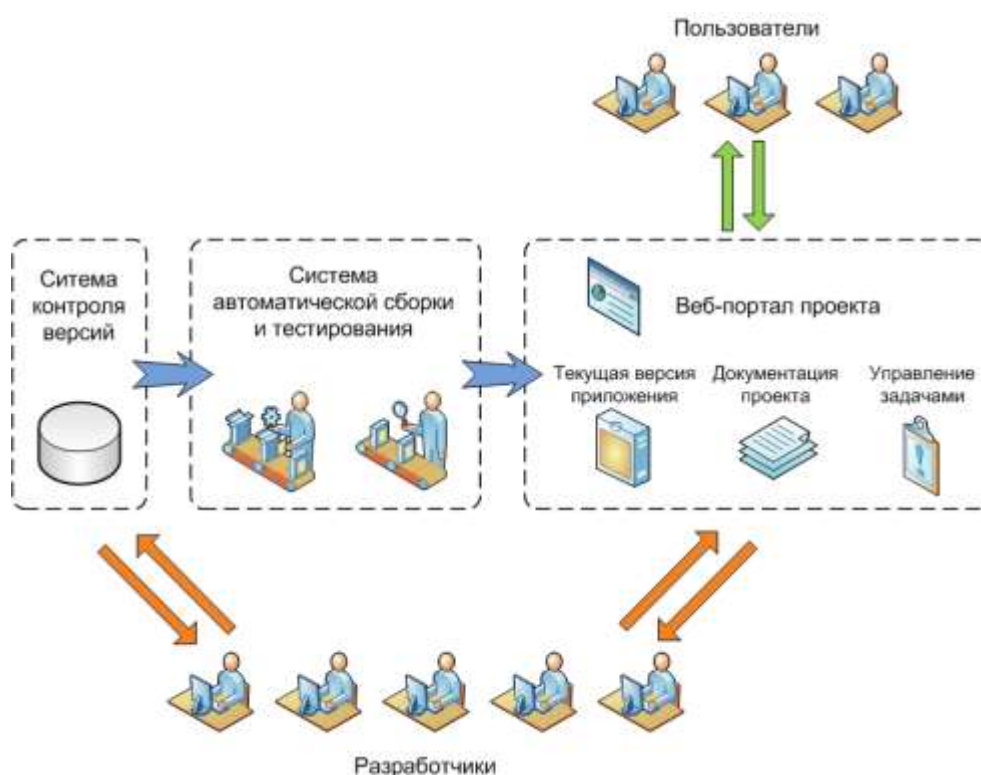


Рисунок 1.24 - Схема процесса разработки программного обеспечения

1.3.1. Реализация и описание подсистемы отображения данных о работе доменных печей

Программный модуль отображения динамики изменения показателей работы доменных печей (рабочее название «Trends») входит в состав комплекса АИС АППС ДЦ [20]. В ходе разработки программного обеспечения подсистемы спроектированы и реализованы серверная часть системы и приложение. Назначением программного обеспечения разрабатываемой подсистемы является предоставление пользователю возможностей отображения в удобном виде показателей работы доменных печей за определенный период, формирования отчетов и экспорта численных значений данных в стандартном формате для дальнейшего анализа программными средствами. Основными процессами при реализации подсистемы «Trends» явились:

- разработка архитектуры программного средства, структуры программных модулей, кодирование;
- тестирование и отладка программного средства;
- документирование системы: разработка руководства пользователя.

До реализации проекта «Trends» данные о работе доменных печей, усредненные по сменам и за сутки, существовали в виде отдельных файлов, которые накапливались на сервере базы данных под управлением СУБД MS SQL Server 2005. Отдельным логическим элементом данных являются технологические показатели работы каждой доменной печи, рассчитанные с помощью интегрированного пакета прикладных программ «Автоматизированное рабочее место инженерно-технического персонала доменной печи» («АРМ мастера ДП») [16], а также данные из АСУ ТП доменной печи.

В процессе разработки было выполнено создание:

- 1) структуры базы данных для заполнения данными из базы ИВЦ АСУ аглодоменного производства;
- 2) программного модуля, позволяющего извлекать технологические показатели работы доменных печей из БД, а также файлов за определенный период работы и представить их изменения в виде графических трендов.

Разработка архитектуры построения подсистемы. Архитектура проектируемой системы представлена на рисунке 1.25.

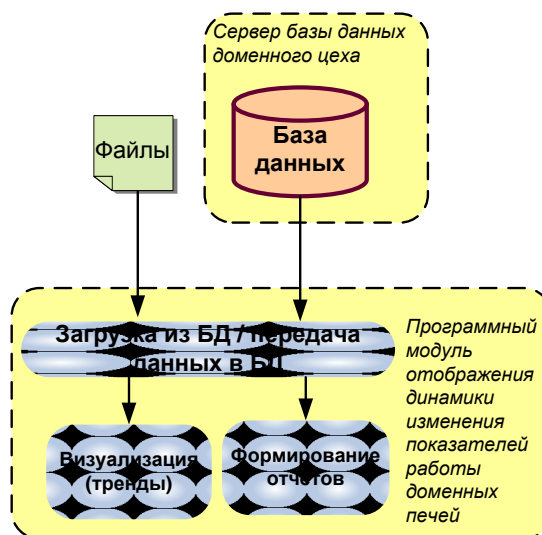


Рисунок 1.25 - Архитектура подсистемы отображения данных о работе доменных печей

Пользовательское приложение предназначено для работы технолога с целью автоматизированного анализа работы доменного цеха и подготовки отчетных документов.

Модуль получения исходных данных выполняет ввод данных в программу. В качестве источника данных выступают файлы и база данных, в которых хранятся данные о работе доменного цеха. Модуль должен выполнять загрузку данных за любой указанный пользователем период.

Модуль визуализации позволяет отобразить данные за выбранный пользователем период в двух режимах: изменения данных по всем показателям для одной доменной печи, изменения данных по одному показателю для всех доменных печей.

Модуль формирования отчетов формирует показатели работы доменного цеха в виде, пригодном для их обработки, распечатки и сохранения во внешнем файле (Excel). Это нужно для формирования твердых копий отчетных документов, которые можно использовать в работе.

Основные функциональные возможности. Программное обеспечение подсистемы позволяет извлечь и представить в удобной графической форме показатели работы доменного цеха и отдельных печей в соответствии с информационными потребностями пользователя. Программа включает две основные процедуры: визуализации и формирования отчетов. Процедура визуализации позволяет отобразить данные за выбранный пользователем период в двух режимах:

- динамика изменения данных по всем доступным показателям для отдельной доменной печи;
- динамика изменения величины по одному выбранному показателю для всех доменных печей.

Процедура формирования отчетов формирует показатели работы доменного цеха в виде, пригодном для их обработки, распечатки и сохранения во внешнем файле (формат MS Excel) для последующего анализа.

Вариант отображения трендов «Одна печь». На главной форме программы (в соответствии с рисунком 1.26) пользователь должен указать для построения следующие:

- номер доменной печи;
- перечень параметров (с помощью флажков);
- начало периода работы печи;
- конец периода работы печи;
- интервал усреднения – смена или сутки.

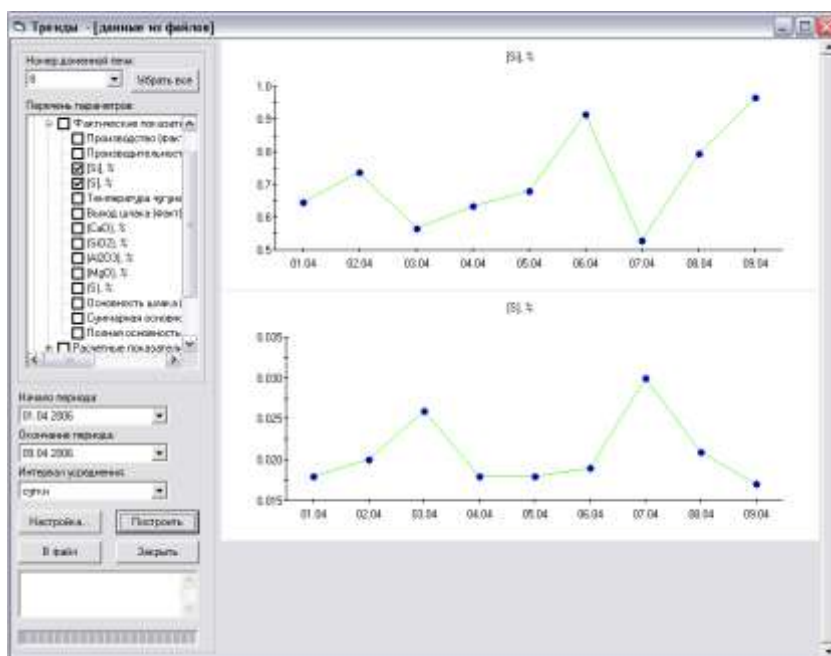


Рисунок 1.26 - Главное окно программы (вариант «Одна печь»)

При нажатии кнопки «Построить» происходит графическое представление выбранных параметров по печи и за период, указанными пользователем.

В случае отсутствия данных программа покажет информацию в соответствующем окне, расположенном на форме. После этого активизируется кнопка «В файл», с помощью которой пользователь может экспортировать численные значения данных и выбранные графические зависимости в файл электронных таблиц MS Office Excel.

Вариант отображения трендов «Все печи». На главной форме программы (в соответствии с рисунком 1.27) пользователь должен указать для построения следующие:

- номера доменных печей (с помощью флажков);

- параметр;
- начало периода работы печи;
- конец периода работы печи;
- интервал усреднения – смена или сутки.

При нажатии кнопки «Построить» происходит графическое представление выбранного параметра по печам и за период, указанными пользователем.

В случае отсутствия данных программа покажет информацию в соответствующем окне, расположенном на форме. После этого активизируется кнопка «В файл».

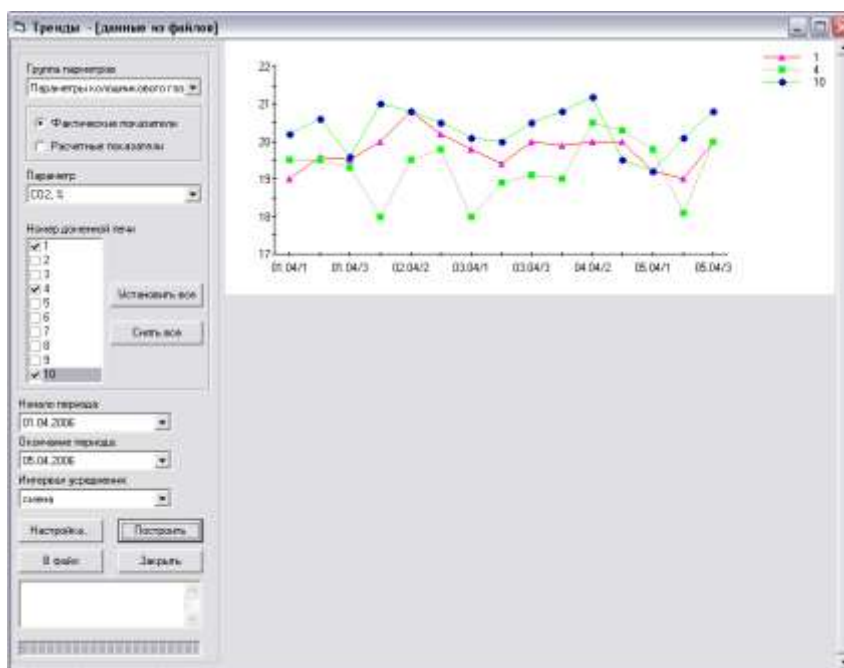


Рисунок 1.27 - Главное окно программы (вариант «Все печи»)

1.3.2. Реализация и описание подсистемы формирования технического отчета доменного цеха

Программная реализация подсистемы формирования технического отчета (модуль «АРМ технолога доменного цеха») осуществлена в связи со следующими обстоятельствами. На ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» для контроля отчетных показателей работы доменного цеха использовался файл электронных таблиц MS Office Excel, который позволял формировать технический отчет о работе цеха за месяц. Наряду с преимуществами такого способа создания отчетной документации в сравнении с ручным он все-таки имеет ряд недостатков:

- одновременно вводить данные может только один человек;
- отсутствует какая-либо защита данного файла от некорректного ввода данных;

- любой сотрудник может получить доступ к секретной информации;
- все расчеты производятся внутри отчета;
- в результате получаем отчет только в одном формате MS Excel;
- отсутствуют механизмы сравнительного анализа показателей за предшествующие периоды работы доменного цеха.

Довольно существенным ограничением является также и то, что отследить и скорректировать показатели работы цеха в целом можно только в конце месяца, а не в любой момент времени. Для решения изложенных проблем было принято решение разработать ПО автоматизированного рабочего места технолога доменного цеха [20].

Назначение программного обеспечения. Программное обеспечение «АРМ технолога доменного цеха» предназначено для предоставления пользователю возможности автоматизированного ввода, хранения, обработки, манипулирования и представления в удобном виде технологических данных о состоянии печей доменного цеха; количестве и качестве полученного чугуна; выполнении графиков; расходе, остатках, химическом составе сырья; качестве кокса. Предусмотрено решение следующих задач:

- автоматизированный сбор и подготовку необходимых отчетных данных о работе доменного цеха за нормативный период (месяц), а также произвольно указанный пользователем период работы (оперативный период). В качестве источников данных могут выступать не только отчетные данные в виде твердых копий документов, но и результаты работы АРМов доменных печей; централизованные информационные ресурсы центра АСУ комбинат;
- представление в удобной табличной и графической форме показателей работы доменного цеха и отдельных печей в соответствии с информационными потребностями пользователя;
- формирование технического отчета доменного цеха за месяц;
- автоматический поиск и отображение показателей работы, которые выходят за границы допустимых величин; диагностика режимов работы, автоматизированный поиск и оперативное отображение возможных факторов нарушения технологических режимов доменной плавки.

Цели создания программного обеспечения. Основными целями создания ПО «АРМ технолога доменного цеха» являются:

- 1) повышение качества производимой продукции за счет повышения оперативности работы технолога печи и сокращения времени анализа качественных показателей сырья и полученного чугуна;
- 2) предоставление детализированной информации о выплавках чугуна для оценки

- экономической эффективности;
- 3) предоставление данных о состоянии печей и оборудования, формирование необходимой отчетной документации;
 - 4) сокращение времени поиска необходимой информации за счет реализации дружественного клиентского интерфейса.
 - 5) повышение культуры управления производством, улучшение условий труда и информированности оперативного и производственного персонала;
 - 6) создание условий для последующего совершенствования и развития системы.

Разработка архитектуры программного обеспечения системы. Архитектура системы принимает вид, показанный на рисунке 1.28.

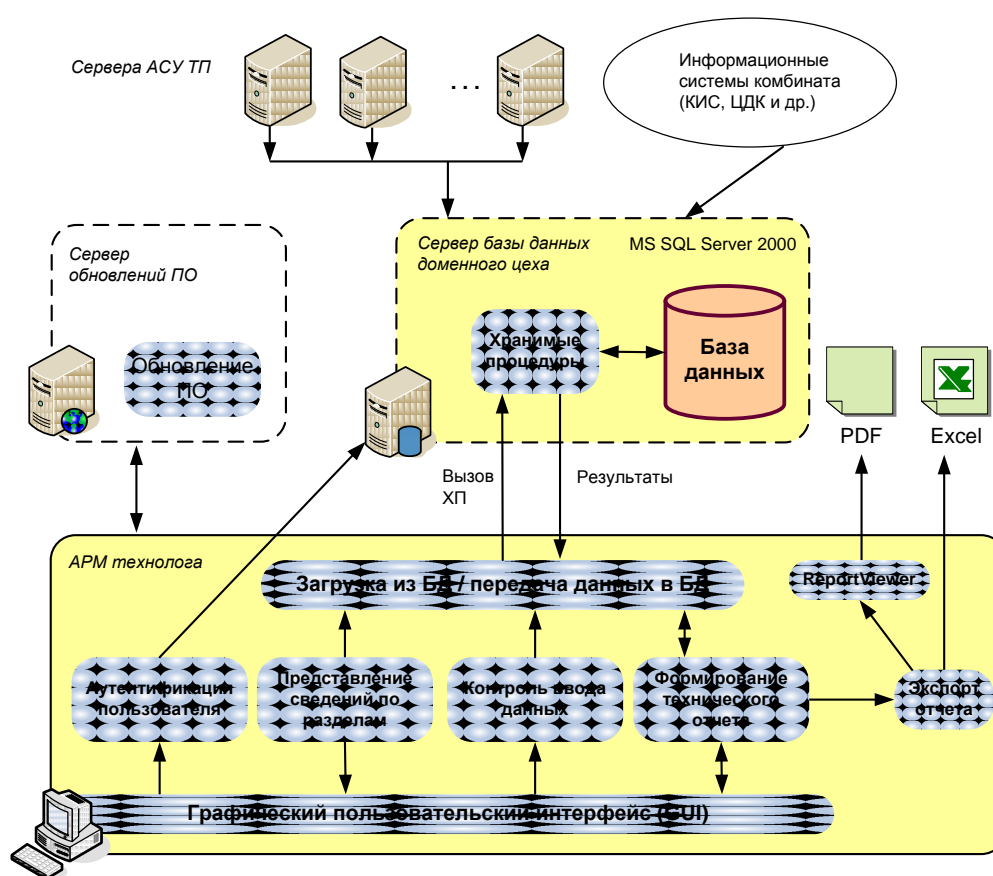


Рисунок 1.28 - Архитектура подсистемы формирования технического отчета

Центральным звеном системы является СУБД MS SQL Server 2005. На сервере хранится централизованная БД, к которой обращаются операторы для её заполнения. Технолог в конце отчетного периода анализирует данные, делает соответствующие выводы на следующий период времени и представляет отчет руководству. При этом технолог имеет право редактировать данные, введенные оператором.

Разработка структуры хранения данных. В базе данных должна быть предусмотрена возможность отслеживания всех изменений данных в рабочих таблицах. Заполнение сведений о пользователях и компьютерах, с которых производятся работа с системой, должно осуществляться через справочники.

Таким образом, в проекте использована модель активного сервера (технология «тонкий клиент»), согласно которой в прикладной программе отсутствуют выражения SQL-запросов на выборку, вставку, изменение и удаление данных [20]. Для манипулирования данными на клиенте использованы вызовы хранимых процедур сервера базы данных. Это даёт несомненные преимущества в гибкости и повышении надёжности ПО системы.

Разработка интерфейса взаимодействия приложения с базой данных. Поскольку в качестве среды разработки используется MS Visual Studio.NET 2005, то для доступа к базе данных используется модель объектов ADO.NET [20].

Программное взаимодействие приложения подсистемы с базой данных реализовано следующим образом. Для каждой сущности, необходимой для формирования определенного раздела технического отчета, создан класс, основу которого составляют следующие подклассы: SqlDataAdapter; SqlConnection; SqlCommand.

Фрагмент структуры интерфейса приложения с базой данных на примере реализации взаимодействия со справочником печей представлена на рисунке 1.29. При разработке функциональной спецификации было уделено особое внимание функциям редактирования, загрузки и сохранения данных в базе данных, поскольку для реализации был использован типизированный источник данных.

Программная реализация системы. Структура программного модуля изображена на рисунке 1.30.

Класс Program – это точка входа в программу, там происходит проверка на наличие ранее запущенных копий программы, и происходит вызов модуля авторизации/аутентификации – frmReg. Класс frmReg проверяет соединение с БД при указанном логине и пароле (в случае SQL авторизации), если соединение с БД разрешено, тогда происходит инициализация и загрузка основного тела программы – frmMain.

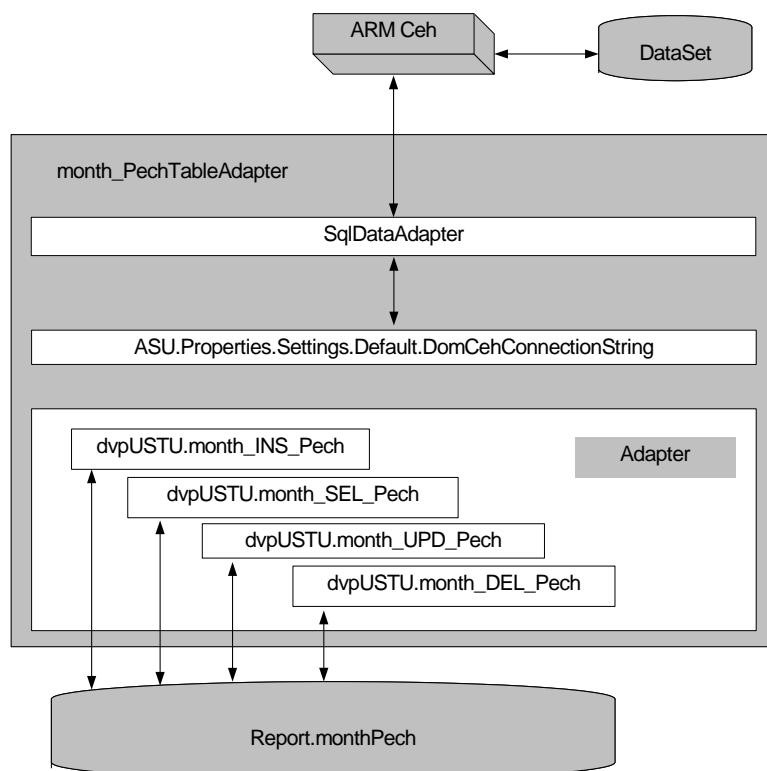


Рисунок 1.29 - Пример структуры интерфейса приложения и базы данных

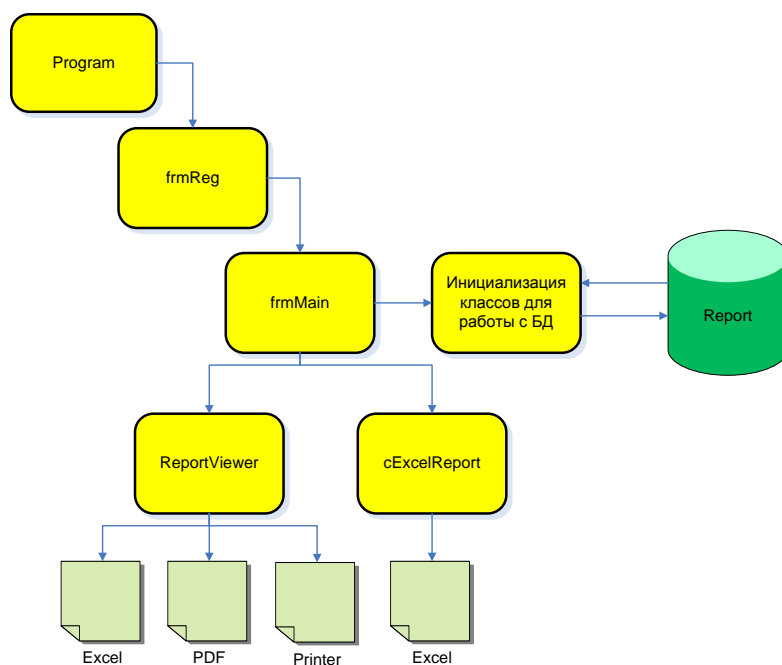


Рисунок 1.30 - Структура программного модуля приложения

Класс sExcelReport дает более гибкие возможности для генерации отчетов в среде MS Excel, чем ReportViewer, поскольку основной задачей последнего является демонстрация отчета и печать. В конечном счете, взаимодействие с MS SQL Server 2005 происходит с помощью вызовов хранимых процедур. В соответствии с современными требованиями индустрии программирования доступ практически ко всем функциям модуля сосредоточен на одной форме, что является несомненным преимуществом для пользователя. Объем рукописного кода для реализации проекта составил около 10000 строк. Необходимо также отметить, что в подсистеме существует процедура аутентификации.

Основные функциональные возможности. Подсистема формирования технического отчета обеспечивает подготовку и формирование всех сведений о работе доменного цеха за календарный месяц или за период с начала года до указанного месяца. Выполнение этой функции обеспечивается сотрудниками технологической группы доменного цеха, ИВЦ АСУ аглодоменного производства, энергоцеха, ЦЛК, экономистами доменного цеха. Руководящими документами для этой подсистемы являются технологическая инструкция доменного цеха, руководства пользователей автоматизированных рабочих мест, нормативно-справочная информация корпоративной сети комбината и требования пользователей к обработке данных. Выходом подсистемы являются отчетные документы по основным разделам доменного производства:

- поступлению и расходу шихтовых материалов и кокса в доменном цехе;
- выплавленному чугуноу и выходу шлака;
- химическому составу и показателям качества сырья, топливно-энергетических ресурсов и продуктов доменной плавки;
- учету простоев и состояния технологического оборудования;
- показателям работы воздухонагревателей;
- использованию ковшей в доменном цехе;
- производительности рабочих кадров доменного цеха.

Основные принципы и понятия, используемые при работе с программным обеспечением. Исходными данными для программы являются данные Центра АСУ ОАО «ММК», а также твердые копии отчетных документов различных служб доменного цеха. Все сведения, входящие в технический отчет, сгруппированы по отдельным разделам. Пользователь с помощью диалоговых окон заполняет сведения по отдельным разделам и сохраняет их в базе данных. Предусмотрено автоматическое формирование итогового документа (целиком и по отдельным разделам), его распечатка, а также экспорт в форматы MS Office Word и Adobe PDF.

Интерфейс программного обеспечения. Интерфейс пользователя можно разделить на две части: разделы технического отчета и данные, относящиеся к разделу. Отчетные данные раздела отображаются за указанный период. Период может составлять либо месяц, либо с начала года до

указанного месяца. Помимо этого данные могут быть относиться к печи или ко всему цеху сразу. *Раздел технического отчета.* В качестве примера, рассмотрим раздел технического отчета «Выплавка чугуна – Передельный». Заполнение сведений этого раздела производится через пользовательскую форму, представленную на рисунке 1.31.

Технический отчет доменного цеха [версия 1.0.0.10] [Пользователь: dvrUSTU]

Настройка Справка

Отчетный период: Декабрь 2007 Показать Состояние отчета: В РАБОТЕ ☒ Все печи Печь: дп 1

Выплавка передельного чугуна

Данные из Центра АСУ

Печь	План календарный, т	План с учетом простоев, т	Налив передельного чистого чугуна (без шлака), т	Слив передельного чистого чугуна (без шлака), т
дп 1	107840,000	107839,695	108441,789	108124,297
дп 2	111250,000	111249,695	111879,406	111883,844
дп 4	108460,000	108459,695	109169,359	108888,523
дп 6	102330,000	102331,000	105098,289	102343,695
дп 7	93270,000	93269,695	93861,227	93740,344

Копировать

Ручная корректировка данных

Печь	План календарный, т	План с учетом простоев, т	Налив передельного чистого чугуна (без шлака), т	Слив передельного чистого чугуна (без шлака), т
дп 1	107840,000	107839,695	108441,789	108124,000
дп 2	111250,000	111249,695	111879,406	111884,000
дп 4	108460,000	108459,695	109169,359	108889,000
дп 6	102330,000	102331,000	105098,289	102335,000
дп 7	93270,000	93269,695	93861,227	93740,000

Добавить Сохранить Удалить Выход

Данные успешно загружены из базы в программу. Отчетный период - Декабрь 2007 г. Отображены данные по всем печам.

Рисунок 1.31 - Форма «Выплавка передельного чугуна»

Форма содержит две таблицы, в которых отображены соответственно данные из Центра АСУ (верхняя таблица) и данные для ручной корректировки (нижняя таблица). Данные из Центра АСУ носят информативный характер и используются как шаблон для формирования раздела технического отчета, их корректировка исключена. Чтобы заполнить сведениями соответствующий раздел, необходимо сначала скопировать данные из верхней таблицы в нижнюю с помощью кнопки «Копировать», а затем в таблице «Ручная корректировка данных» при необходимости добавить, изменить или удалить данные с помощью кнопок в правой части формы. Все действия по корректировке необходимо завершать нажатием на кнопку «Сохранить», в результате чего данные будут сохранены в базе данных доменного цеха Центра АСУ комбината.

В этом разделе формы пользователь имеет возможность ввести и (или) скорректировать сведения о выплавке передельного чугуна в отчетном месяце по каждой доменной печи. Добавление новой строки осуществляется при нажатии кнопки «Добавить». После ввода или корректировки строк для сохранения данных в базе необходимо нажать кнопку «Сохранить». Удаление строки осуществляется с помощью кнопки «Удалить», при этом происходит автоматическое удаление строки данных из базы без возможности ее восстановления.

Отчеты. Форма «Отчеты» позволяет пользователю генерировать отчеты. Окно выбора разделов, которые появятся в итоговом виде отчета, представлено на рисунке 1.32. Здесь пользователь может выбрать:

- отчетный месяц;
- разделы, которые перейдут в отчет;
- формат отчета;
- настроить выбранные форматы Excel или ReportViewer.

Чтобы сформировать и отобразить его на экране отчет, надо выбрать разделы и нажать кнопку «Отчет».

Отчет в ReportViewer. Предварительный просмотр отчета в формате ReportViewer представлен на **рисунке 1.33**.

Формат ReportViewer предоставляет следующие возможности:

- печатать отчет по отдельным листам;
- предварительный просмотр отчета с возможностью масштабирования;
- поиск фраз в отчете;
- направлять печать отчета на указанный принтер, настраивать параметры принтера и свойства печатаемого документа;
- устанавливать параметры страницы: ориентацию, поля страницы (отступы слева, справа, сверху и снизу).
- сохранять отчет в формат электронных таблиц Excel или pdf.

Справочники. Все справочники представлены в программе в качестве сопроводительной информации, они не подлежат корректировке. Внесение данных в справочники производится из других информационных систем комбината. Справочная информация сгруппирована по разделам (в соответствии с рисунком 1.34).

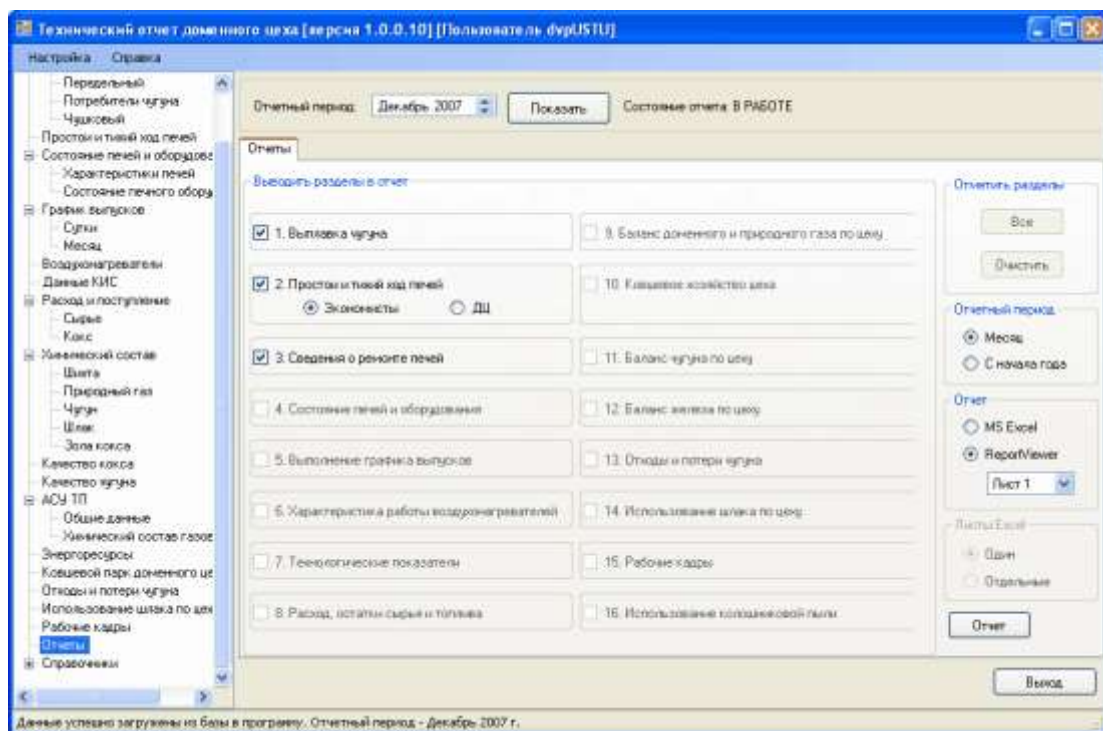


Рисунок 1.32 - Форма «Отчеты»

Технический отчет ДЦ (лист 1): предварительный просмотр

1 of 100%

Find: J Next

Технический отчет доменного цеха

Отчетный период: Декабрь 2007 г.

1. Выплавка чугуна.

	дп 1			дп 2			дп 4			дп 6			дп 7	
Наименование	план	отчет	%	план	отчет	%	план	отчет	%	план	отчет	%	план	отчет
Передельный	107840	108124	100.3	111250	111884	100.6	108460	108889	100.4	102330	102335	100.0	93270	93740
Всего в натуре	107840	108124	100.3	111250	111884	100.6	108460	108889	100.4	102330	102335	100.0	93270	93740
Всего в перед.	107840	108124	100.3	111250	111884	100.6	108460	108889	100.4	102330	102335	100.0	93270	93740
Всего в натуре с нач. года	1275680	1273244	99.8	1272565	1292710	101.6	1251775	1211645	96.8	1071970	1062265	99.1	964440	957356
Всего в перед. с нач. года	1275680	1273244	99.8	1272565	1292710	101.6	1251775	1211645	96.8	1071970	1062265	99.1	964440	957356
Отклонение от плана за месяц		284			634			429			5			470
Отклонение от плана с нач. года		-2436			20145			-40131			-8705			-7084
Выплавленного чугуна с кислородом, т		108124			111884			108889			102335			93740
Выплавленного чугуна с кислородом с нач. года, т		1273244			1292710			1211645			1062265			957356
Выплавлено чугуна с природным газом, т		108124			111884			108889			102335			93740
Выплавлено чугуна с природным газом с нач. года, т		1273244			1292710			1211645			1062265			957356

2. Простой и тихий ход печей.

	дп 1	дп 2	дп 4	дп 6
1. Текущие простои, всего, час.мин.	1.00	2.15	9.45	3.30
% к номинальному времени	0.134	0.302	1.310	0.470

Рисунок 1.33 - Отчет в ReportViewer

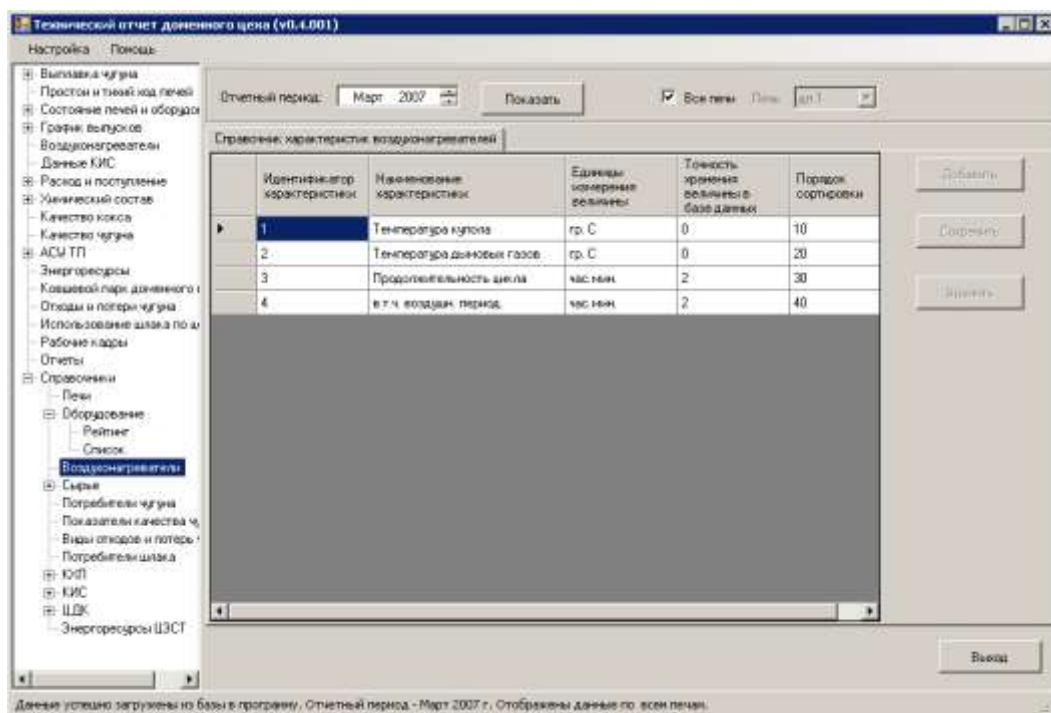


Рисунок 1.34 - Форма «Справочник характеристик воздухонагревателей»

Прокомментируем для примера принцип содержания справочника «Справочник характеристик воздухонагревателей»:

- «Идентификатор характеристики» – это ключевое поле таблицы. Используется в других таблицах как внешний ключ;
- «Наименование характеристики» – текстовое представление, чтобы оператор понял, о какой характеристике идет речь;
- «Порядок сортировки» – вес указанной характеристики при сортировке, чем ниже вес, тем выше в списке она будет.

1.3.3. Реализация и описание подсистемы сопоставления отчетных показателей работы доменного цеха

Основные функциональные возможности. Программный модуль «Сравнение показателей работы доменных печей» (подсистема сопоставительного анализа работы печей и доменного цеха АИС АППС ДЦ) является компьютерной системой для автоматического извлечения отчетных показателей из базы данных Центра АСУ аглодоменного производства и сравнения результатов работы печей и цеха по фактическим данным за два произвольно выбранных периода работы цеха. Содержанием данных являются разделы технического отчета доменного цеха.

Для использования программу необходимо установить (инсталлировать) на персональный компьютер и установить подключение к базе данных Центра АСУ аглодоменного производства.

Предусмотрено отображение результатов сопоставления на экране в табличном виде и графическом представлении в виде гистограмм. Результаты сравнения можно распечатать в отчет или экспортировать в другие форматы.

Данный программный модуль входит в состав программного комплекса «АРМ инженерно-технологического персонала доменного цеха».

Основные принципы и понятия, используемые при работе с программным обеспечением. В программе задается два сравниваемых периода: отчетный и сравнительный. В качестве отчетного и сравнительного периодов можно выбрать месяц или установить расчет показателей с начала года до указанного месяца.

Имеется ряд показателей, по которым можно сравнить два периода, для удобства все показатели разделены на группы, которые называются «Разделы технического» отчета. Чтобы выбрать необходимый показатель, сначала необходимо выбрать нужный раздел технического отчета.

После успешного подключения к базе данных пользователю отображается главная форма приложения (в соответствии с рисунком 1.35).

Модуль сравнения отчетных показателей работы ДЦ [версия 0.9.4.7] [Пользователь ...]

Выбрать задачу: Сравнение показателей работы

Отчетный период: 1
Месяц: Февраль 2009

Сравнительный период: 2
Месяц: Январь 2009

Выход

☒ Сравнить 3 ☐ месяц ☐ с начала года

Сравните показатели работы доменных печей

Раздел технического отчета: 4
Простой и тихий ход печей

Показатель: 5
Номинальные сутки

Показать

Номинальные сутки

	Тип показателя	ДП-1	ДП-2	ДП-4	ДП-6	ДП-7
▶	Отчет	0.00	28.00	26.45	28.00	19.61
	Отчет (сравн. месяц)	0.00	4.21	31.00	29.38	0.00
	Откл. (отчет - отчет сравн...)	0.00	23.80	-4.55	-1.38	19.61
*						

6 Диаграмма 7 Отчет

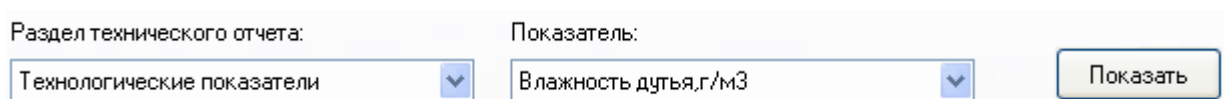
Отчетные данные успешно загружены

Рисунок 1.35 - Главная форма приложения

Форма позволяет выбрать по календарю отчетный (1) и сравнительный (2) периоды, устанавливать режим сравнения (3) – месяц или с начала календарного года, выбирать раздел технического отчета (4) и устанавливать соответствующий показатель (5). После нажатия кнопки «Показать» (5) в таблице отображаются показатели в режиме сопоставления, а также их отклонения от отчетного периода. Если возможно визуальное отображение, то активизируется кнопка «Диаграмма» (6). Результаты сравнения показателей возможно отобразить в отчете (7) с возможностью его предварительного просмотра, распечатки или экспорта в форматы офисных документов.

Приведем описание порядка работы с разделами технического отчета.

Выбор раздела технического отчета. Программа позволяет выбирать показатели работы доменных печей для сопоставления в отчетном и сравнительном периодах. Выбор раздела технического отчета и конкретного показателя осуществляется с помощью списков, представленных на пользовательской форме (в соответствии с рисунком 1.36).



The screenshot shows a user interface with two dropdown menus and a button. The first dropdown menu is labeled 'Раздел технического отчета:' and contains the text 'Технологические показатели'. The second dropdown menu is labeled 'Показатель:' and contains the text 'Влажность дутья, г/м3'. To the right of these menus is a button labeled 'Показать'.

Рисунок 1.36 - Выбор раздела технического отчета и показателя

В программе доступны все имеющиеся разделы технического отчета. В качестве примера приведем подробности раздела «Производство чугуна». В этом разделе технического отчета пользователь имеет возможность выполнить количественную и визуальную оценки показателей за отчетный и сравнительный периоды. Выбор отчетного и сравнительного периодов осуществляется по соответствующим календарям. Отчетная дата должна быть установлена позже сравнительной, иначе программа запретит выход из календаря. Показатель раздела технического отчета «Производство чугуна», доступный для сравнения, «Всего чугуна в передельном». В качестве периодов сравнения возможна установка с помощью переключателя варианта «с начала года». В этом случае показатели будут автоматически пересчитаны с начала календарного года до установленного месяца. Отображение показателей производится на пользовательской форме следующего вида (в соответствии с рисунком 1.37).

На форме представлена таблица, в которой отображены количественные данные выбранного показателя за отчетный и сравнительный периоды, а также их отклонения от отчетного периода. Если существует возможность графического отображения, то в нижней части формы активизируется кнопка «Диаграмма». Фрагмент формы с диаграммой представлен на рисунке 1.38.

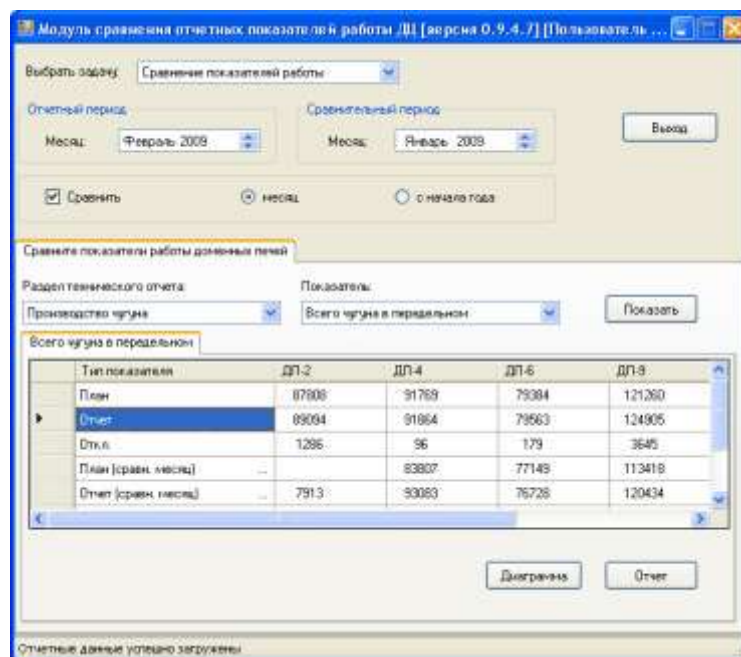


Рисунок 1.37 - Отображение отчетных показателей из раздела «Производство чугуна»

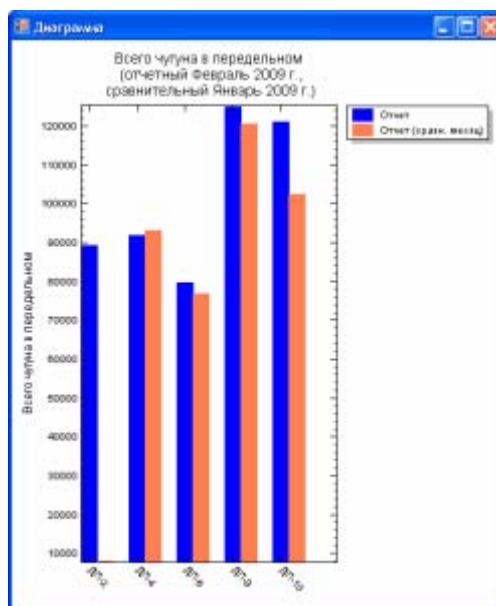


Рисунок 1.38 - Визуализация показателя из раздела «Производство чугуна»

Просто и тихий ход печей. В этом разделе технического отчета пользователь имеет возможность выполнить количественную и визуальную оценки показателей за отчетный и сравнительный периоды. Выбор отчетного и сравнительного периодов осуществляется по соответствующим календарям. Отчетная дата должна быть установлена позже сравнительной, иначе программа запретит выход из календаря.

Подготовка и формирование отчета. Программа позволяет формировать отчет по результатам сравнения показателей работы доменного цеха. При этом предусмотрены следующие функции:

- предварительный просмотр отчета с возможностью масштабирования;
- поиск фраз в отчете;
- экспорт созданного отчета в форматы документов pdf или MS Office Excel;
- устанавливать параметры страницы: ориентацию, поля страницы (отступы слева, справа, сверху и снизу).
- настраивать параметры страницы;
- направлять печать отчета на указанный принтер

Программа позволяет формировать отчет по результатам сравнения показателей работы доменного цеха с возможностью его предварительного просмотра. Чтобы создать отчет, надо выбрать разделы и нажать кнопку «Отчет» (в соответствии с рисунком 1.39).

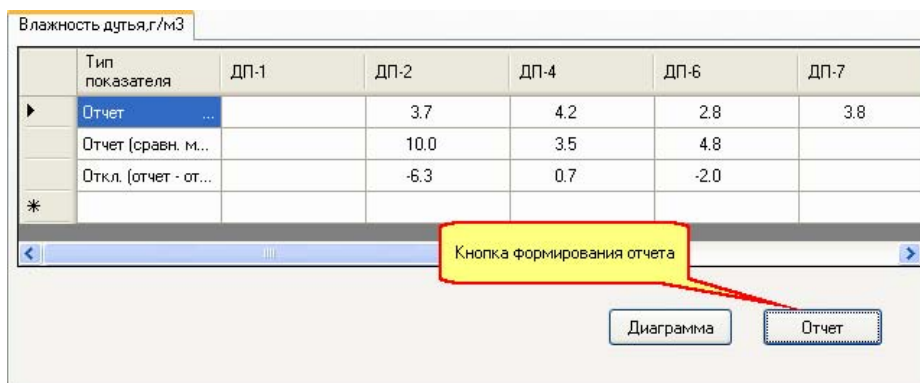


Рисунок 1.39 - Фрагмент окна «Формирование отчета»

После некоторого промежутка времени на экране в отдельной форме появится отчет, фрагмент которого представлен на рисунке 1.40.



Рисунок 1.40. Окно предварительного просмотра отчета

1.3.4. Реализация и описание подсистемы оптимального управления топливно-энергетическими ресурсами доменного цеха

Программа предназначена для расчета оптимального распределения природного газа в группе доменных печей [20,21]. Для каждой печи при оптимальной подаче природного газа возможно определение следующих показателей ее работы:

- расход природного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$;
- расход кокса, $\text{т}/\text{ч}$;
- производительность печи, $\text{т}/\text{ч}$;
- температура горения на фурмах, $^{\circ}\text{C}$;
- содержание кремния в чугуна, %;
- содержание серы в чугуна, %;
- удельные затраты тепла в нижней зоне печи, $\text{МДж}/\text{т}$ чугуна;
- отношение теплоемкостей потоков в шахте, доли;
- степень уравнивания шихты, доли;
- эффективность использования газа, $\text{руб.}/\text{ч}$.

В программе предусмотрено два варианта расчета:

- 1) по реальным данным;
- 2) демонстрационный расчет.

Расчет по реальным данным предполагает загрузку в программу и использование в расчете исходных данных, содержащих фактические значения показателей работы доменных печей за прошедший период. В качестве периода, используемого для усреднения производственных показателей, принята календарная неделя начиная с конкретной даты работы доменных печей. При этом программа автоматически определяет состав исходных данных и максимально возможное количество печей, по которым будет рассчитано оптимальное перераспределение природного газа за соответствующий период.

Демонстрационный расчет используется для моделирования производственных ситуаций. В этом случае производится расчет по данным, содержащимся в настроечных файлах. Все изменения в исходных данных автоматически запоминаются и используются программой при ее последующем вызове.

В программе предусмотрено решение задачи оптимального распределения природного газа для двух периодов работы доменных печей:

- 1) базового;
- 2) проектного.

Расчет для базового периода производится по фактическим исходным данным, отражающим уже прошедший период работы доменных печей. В этом случае пользователь с помощью программы может оценить, насколько эффективно был использован природный газ. В частности, можно рассчитать для прошедшего периода оптимальный расход природного газа на каждую печь, определить показатели работы печей при этом расходе и выполнить сравнительный анализ всех вышеперечисленных показателей при произошедшей (базовой) и оптимальной подаче природного газа.

В проектном периоде возможен расчет при изменении пользователем некоторых параметров работы доменных печей, например дутьевых (влажности и температуры дутья, а также содержания в нем кислорода). В этом случае за основу расчета берется базовый период работы доменных печей, т.е. все основные показатели выбираются как усредненные за предшествующую календарную неделю. Расчет по программе для проектного периода можно использовать для определения оптимального распределения природного газа и показателей работы в будущем периоде, когда предполагается изменение дутьевых параметров работы отдельных печей. В этом случае будут рассчитаны оптимальные значения показателей работы для каждой доменной печи.

После запуска приложения на экране появляется главная форма программы, в центре которой изображено окно приветствия (в соответствии с рисунком 1.41). В этом окне пользователь с помощью переключателя может выбрать варианты расчета – по реальным данным или демонстрационный – или закрыть окно. В зависимости от выбора пользователя далее последует вызов мастера загрузки исходных данных.

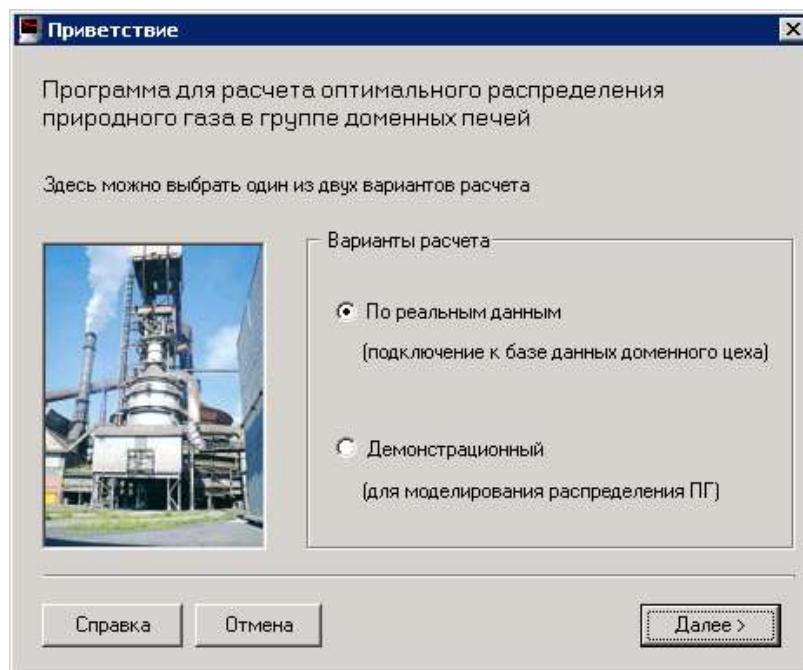


Рисунок 1.41 - Окно приветствия программы

На экране появляется первое из четырех окон мастера загрузки исходных данных (в соответствии с рисунком 1.42), на котором пользователь должен выбрать дату начала периода импортирования исходных данных. Варианты выбора – прошедшая неделя или самостоятельный выбор даты начала недели по календарю.

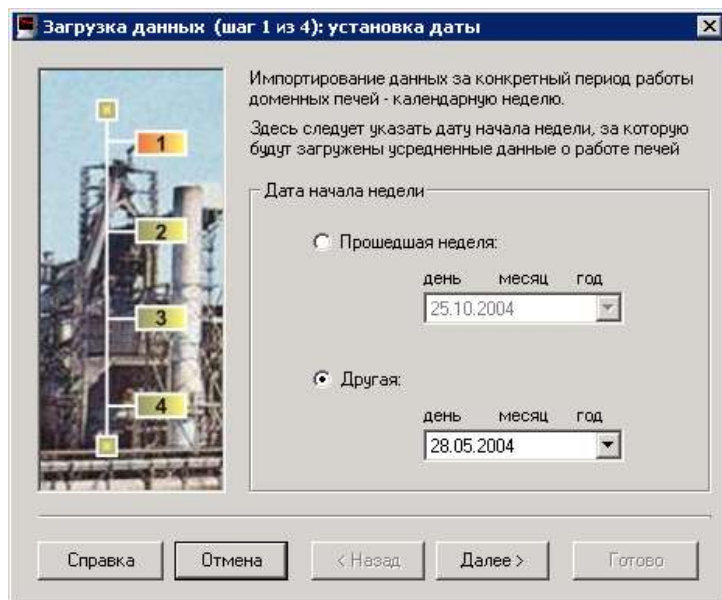


Рисунок 1.42 - Окно загрузки реальных данных: установка даты

На втором шаге пользователю предоставляется возможность выбора двух и более печей для расчета из общего числа доступных (в соответствии с рисунком 1.43).

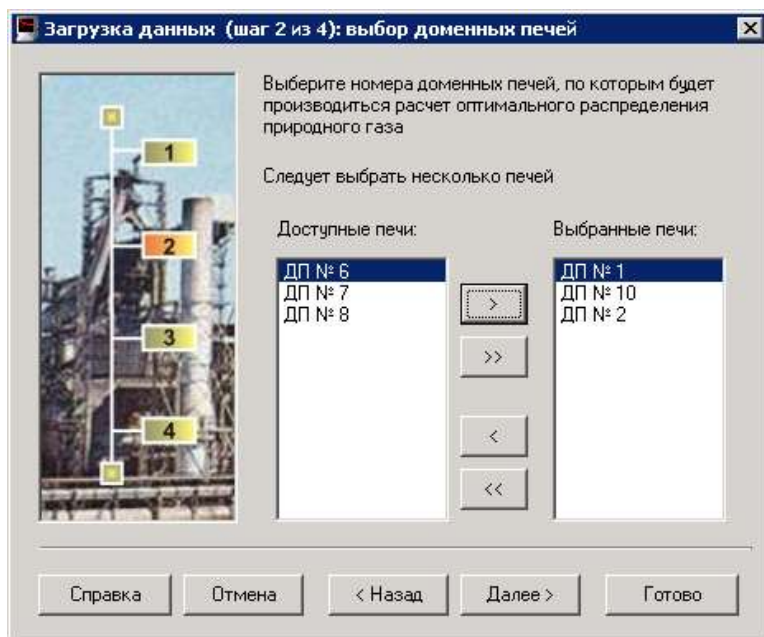


Рисунок 1.43 - Окно загрузки реальных данных: выбор доменных печей

Общее число доступных печей определяется программой автоматически по наличию исходных данных за период, дату которого определил пользователь на предыдущем шаге.

Третий шаг позволяет пользователю отметить различные типы ограничений на доменные печи, которые будут учитываться при расчете оптимального распределения природного газа (в соответствии с рисунком 1.44). Выбор того или иного типа ограничений влияет на величину диапазона варьирования расхода природного газа, в пределах которого будет рассчитываться оптимальный расход.

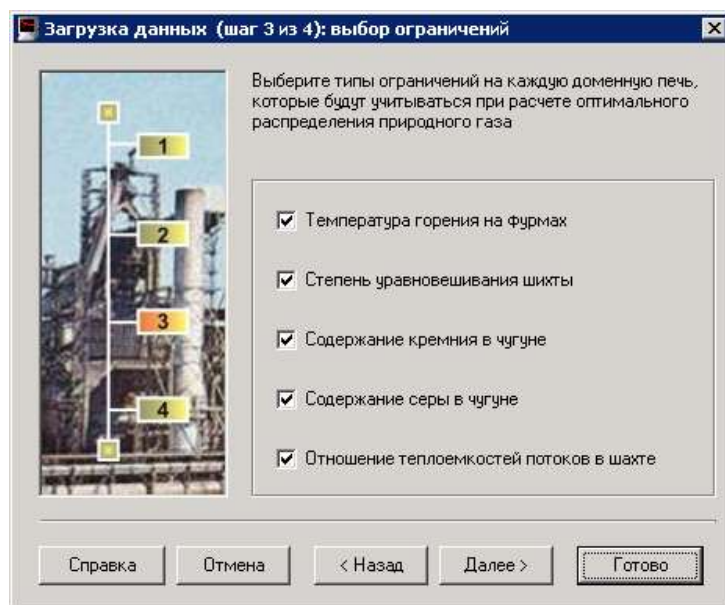


Рисунок 1.44 - Окно загрузки реальных данных: выбор ограничений

В программе возможен учет следующих типов ограничений:

- температура горения на фурмах;
- степень уравнивания шихты;
- содержание кремния в чугуне;
- содержание серы в чугуне;
- отношение теплоемкостей потоков в шахте.

На последнем, четвертом шаге пользователь должен задать максимальные ресурсы по расходу природного газа (м³/ч) и кокса (т/ч) на группу печей, а также минимально допустимую производительность чугуна в цехе (т/ч). По умолчанию в окне мастера (в соответствии с рисунком 1.45) в соответствующих полях для редактирования уже внесены величины, рассчитанные исходя из базовых значений параметров с учетом количества выбранных печей.

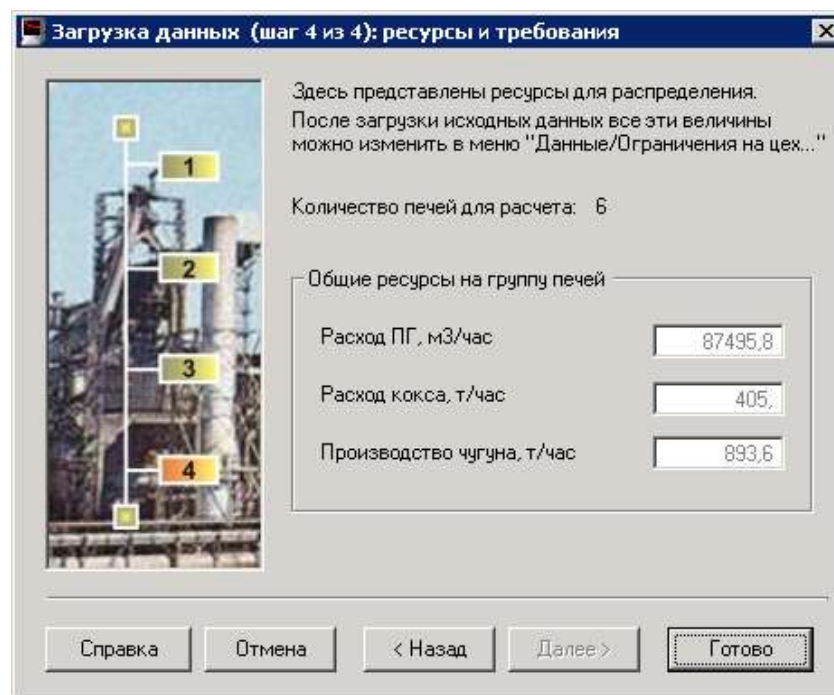


Рисунок 1.45 - Окно загрузки реальных данных: ресурсы и требования

При осуществлении расчетов указанные величины можно переопределить в меню «Данные / Ограничения на цех...». Нажатие кнопки «Готово» приводит к окончанию загрузки исходных данных для расчета.

Выбор варианта расчета «Демонстрационный» пользователь загружает демонстрационные исходные данные с помощью трех шагов мастера. Внешний вид окон мастера аналогичен рассмотренным ранее (Рисунок 1.41 – 1.45).

Главное меню программы включает в себя следующие пункты:

- *Файл;*
- *Данные;*
- *Расчет;*
- *Результаты;*
- *Отчет;*
- *Справка.*

Первоначально после загрузки данных пользователю доступны только первые три пункта меню, а также пункт «Справка». Команды «Результаты» и «Отчет» заблокированы и становятся доступными только после выполнения расчета.

Пункт меню «Файл» позволяет пользователю изменить в течение работы с программой вариант загрузки исходных данных, а также корректно завершить ее выполнение.

Пункт меню «Данные» приводит к появлению подменю, в котором сгруппированы следующие функциональные категории команд:

- просмотр и корректировка основных усредненных показателей работы доменных печей;
- ввод ограничений по топливно-энергетическим ресурсам и производительности в целом на цех;
- задание различных типов ограничений и их количественных величин по каждой печи в отдельности;
- просмотр и корректировка численных значений коэффициентов, используемых для расчета параметров оптимизации;
- задание удельных стоимостных характеристик природного газа и кокса;
- установка всех вышеперечисленных величин по умолчанию (только для демонстрационного варианта расчета).

Команда «Показатели работы..» предназначена для отображения в специальном окне (в соответствии с рисунком 1.3.23) основных усредненных базовых показателей работы для тех доменных печей, которые выбраны пользователем для расчета оптимального распределения природного газа. Максимально возможное количество печей для расчета составляет десять, показатели не используемых в расчете печей скрыты от пользователя. Все величины расположены в специальных полях для редактирования. Наименования показателей работы отображаются в виде всплывающих подсказок, появляющихся при наведении на соответствующее поле указателя мыши. При необходимости пользователь может скорректировать любую базовую величину.

Основные базовые показатели работы доменных печей, отображаемые в окне на рисунке 1.46, следующие:

- расход кокса, т/ч;
- производство чугуна, т/ч;
- температура горения на фурмах, °С;
- эквивалент замены кокса, кг кокса/м³ газа;
- расход природного газа, м³/ч.

В правом верхнем углу окна представлены обобщенные показатели работы цеха, которые рассчитаны по базовым показателям отдельных печей и не поддаются корректировке:

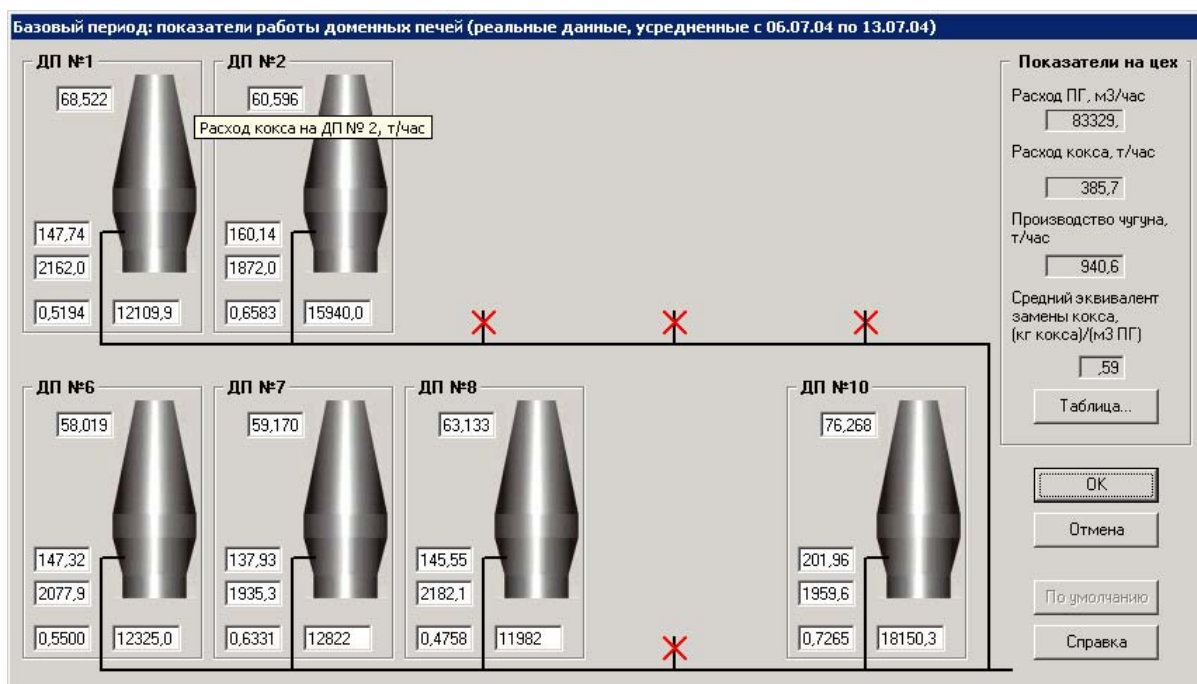


Рисунок 1.46 - Окно отображения основных базовых показателей работы печей

- суммарный расход газа, м³/ч;
- суммарный расход кокса, т/ч;
- общая производительность всех печей, т/ч;
- средний эквивалент замены кокса по цеху, кг кокса/м³ газа.

Нажатие кнопки «Таблица...» приводит к появлению на экране окна с усредненными показателями работы (в соответствии с рисунком 1.47),

Базовый период: показатели работы доменных печей (реальные данные, усредненные с 06.07.04 по 13....)

Просмотр и корректировка усредненных значений показателей о работе доменных печей в базовом периоде

Показатель	ДП № 1	ДП № 2	ДП № 3	ДП № 4	ДП № 5	ДП № 6	ДП № 7
Расход ПГ, м ³ /час	12110,	15940,				12325,	12822,
Расход кокса, кг/час	68,52	60,6				58,02	59,17
Эквивалент замены, доли	,52	,66				,55	,63
Производительность печи, т/час	147,7	160,1				147,3	137,9
Степень уравновешивая шихты, доли	,505	,425				,421	,463
Отношение теплёмкостей потоков, доли	,834	,986				,909	,86
Температура горения, °C	2162,	1872,				2078,	1935,
Показатель тепл.сост.низа, МДж/(т чугуна)	2972,9	2107,7				2380,7	2511,2
Содержание Si в чугуне, %	,55	,46				,83	,61
Содержание S в чугуне, %	,015	,024				,018	,019

Справка

OK

Отмена

По умолчанию

Рисунок 1.47. Таблица отображения базовых показателей работы печей

в котором помимо вышеперечисленных показателей дополнительно отображены следующие:

- степень уравнивания шихты, доли;
- отношение теплоемкостей потоков в шахте, доли;
- показатель теплового состояния низа печи (удельные затраты тепла в нижней зоне печи), МДж/т чугуна;
- содержание кремния в чугуне, %;
- содержание серы в чугуне, %.

Пользователь может скорректировать любой доступный показатель двойным щелчком мыши в соответствующей ячейке таблицы. Нажатие кнопки Esc в процессе редактирования приводит к откату изменяемого показателя и восстановлению его исходной величины. В процессе корректировки каждой ячейки предусмотрена защита от некорректно вводимых данных.

Выбор подпункта меню «Ограничения на цех» приводит к появлению окна, вид которого представлен на рисунке 1.48.

Ограничения на цех (реальные данные, усредненные с 06.07.04 по 13.07.04)	
Здесь устанавливаются общие ресурсы и требуемое производство чугуна на группу доменных печей	
Ресурс по природному газу, м3/час	87495,8
Ресурс по расходу кокса, т/час	405,
Требуемое производство чугуна, т/час	893,6

Buttons: OK, Отмена, По умолчанию, Справка

Рисунок 1.48 - Окно ввода и корректировки ограничений на цех

Здесь отображены суммарные резервные величины по расходам природного газа и кокса в целом по цеху, а также минимально допустимая (требуемая) производительность цеха по чугуну. Первоначально эти величины установлены по результатам выбора пользователя, сделанного им в окне мастера загрузки исходных данных (в соответствии с рисунком 1.45). Однако пользователь в любой момент может скорректировать эти величины. Команда «Ограничения на печи...» вызывает появление на экране окна, в котором пользователь может определить различные типы ограничений, а также изменить количественные величины каждого типа для каждой отдельно выбранной для расчета доменной печи (в соответствии с рисунком 1.49). Выбор конкретной печи осуществляется из выпадающего списка, в котором присутствуют только те печи, по которым будет проводиться расчет.

В программе возможен учет следующих типов ограничений на доменную печь с установленными максимальными и минимальными значениями соответствующих параметров:

- прямой расход природного газа;
- температура горения на фурмах;
- степень уравнивания шихты газовым потоком;
- содержание кремния в чугуна;
- содержание серы в чугуна;
- отношение теплостокостей потоков в шахте печи.

С помощью флажков пользователь может установить или исключить учет соответствующего типа ограничений. В случае установки конкретного типа ограничения его максимальная и минимальная величины будет пересчитываться соответственно на максимально и минимально возможную величины расхода природного газа. В итоге будет изменяться диапазон варьирования величины расхода природного газа на отдельной доменной печи, в пределах которого будет осуществляться поиск его оптимального значения.

Первоначальные предельно допустимые численные значения всех величин, участвующих в ограничениях, автоматически загружаются вместе с исходными данными. Для настройки программы на реальный процесс пользователь может скорректировать указанные величины. Чтобы установить первоначальные значения, необходимо нажать кнопку «По умолчанию», которая активизируется только для демонстрационного варианта расчета.

Команда «Коэффициенты...» позволяет пользователю просмотреть и скорректировать численные значения коэффициентов для каждой печи, которые используются в оптимизационной модели. Вид диалогового окна представлен на рисунке 1.50. При наведении курсора мыши на поле редактирования в нижней части окна появляется пояснение физического смысла соответствующего коэффициента.

В случае расчета по реальным данным коэффициенты автоматически рассчитываются для каждой печи по специальной методике анализа реальных показателей доменной плавки за конкретный период ее работы.

Ограничения на доменные печи (реальные данные, усредненные с 06.07.04 по 13.07.04)

Здесь устанавливаются различные виды и численные значения ограничений, которые будут учтены при расчете оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов

Доменная печь: ДП № 1 Снять все Установить все

<input checked="" type="checkbox"/> Расход ПП Минимум Максимум 20000,	<input checked="" type="checkbox"/> Содержание Si в чугуна, % Минимум .4 Максимум 1,	<input checked="" type="checkbox"/> Степень уравнивания шихты, доли Минимум 0, Максимум .55
<input checked="" type="checkbox"/> Температура горения, °C Минимум 1900, Максимум 2300,	<input checked="" type="checkbox"/> Содержание S в чугуна, % Минимум 0, Максимум .025	<input checked="" type="checkbox"/> Отношение теплоемкостей потоков в шахте, доли Минимум .6 Максимум .95

Справка OK Отмена По умолчанию

Рисунок 1.49 - Окно установки ограничений на каждую доменную печь

Для демонстрационного варианта расчета все коэффициенты поступают в программу из специального настроечного файла «file.dat», который расположен на диске в том же каталоге, из которого производилась загрузка программы. После завершения текущего сеанса работы пользователя все значения коэффициентов сохраняются в этом же файле и используются при последующей загрузке демонстрационного варианта расчета.

Команда «Экономические параметры...» выводит на экран окно, в котором пользователь может просмотреть и скорректировать стоимостные характеристики природного газа и кокса. Вид окна представлен на рисунке 1.51. В случае демонстрационного варианта расчета пользователь может задать эти величины из файла настройки, нажав кнопку «По умолчанию».

Команда меню «Установить по умолчанию» активизирована только для демонстрационного варианта расчета. При ее выполнении в текущем сеансе автоматически загружаются все исходные данные из файла настройки. Эту команду удобно использовать, если пользователь ошибочно скорректировал какие-либо исходные данные и захотел загрузить в программу «правильные», корректные величины без завершения программы.

Пункт меню «Расчет»

Включает в себя две команды:

- *базовый период;*
- *проектный период.*

Установка режима корректировки коэффициентов

Доменная печь: ДП № 1

☒ Редактировать

Коэффициенты

ПГ - C	-.00000161	Кокс - C	-.00000537	Производит. - C	.00008228
ПГ - [Si]	.00009259	Кокс - [Si]	.00017629	Производит. - [Si]	0,
ПГ - [S]	.00000001	Кокс - [S]	.00000063	Производит. - [S]	.00002264
ПГ - W	-.00000222	Кокс - W	.00000426	Производит. - W	.00019932
ПГ - производит.	-.00094143	Кокс - производит.	-.00348783		
ПГ - T горения	-.03843791				

Здесь осуществляется корректировка коэффициентов, учитывающих особенности работы каждой печи. Коэффициенты необходимы для расчета оптимального распределения природного газа на каждую из печей цеха

OK По умолчанию
Отмена Справка

Пояснение физического смысла коэффициента

Рисунок 1.50 - Окно для отображения и корректировки коэффициентов

Экономические параметры (реальные данные, усредненные с ...)

Здесь можно изменить стоимостные характеристики топливно-энергетических ресурсов

Стоимость кокса, руб./т 3300

Стоимость природного газа, руб./1000 м3 925

OK
Отмена
По умолчанию
Справка

Рисунок 1.51 - Окно ввода стоимостных характеристик

Выбор команды «Базовый период» приводит к немедленному выполнению процедуры расчета оптимального распределения природного газа между доменными печами. В этом случае, как уже было отмечено ранее, расчет выполняется на основе усредненных базовых показателей работы доменных печей за прошедший период работы с учетом выбранных типов ограничений. В случае успешного завершения расчета пользователю на экран выводится специальное сообщение. После этого в главном меню программы активизируются команды «Результаты» и «Отчет», которые недоступны пользователю без выполнения команд меню «Расчет». При любых изменениях исходных данных команды «Результаты» и «Отчет» снова будут заблокированы до тех пор, пока пользователь заново не выполнит расчет.

Выбор команды «Проектный период...» позволяет пользователю задать изменение некоторых параметров работы доменных печей в проектном периоде. В частности, возможно изменение следующих дутьевых параметров (в соответствии с рисунком 1.52):

Проектный период: изменение параметров работы доменных печей

Введите проектные параметры работы доменных печей, по которым будет производиться расчет оптимального распределения природного газа.

Номер печи

- ☒ ДП №1
- ☐ ДП №2
- ☐ ДП №3
- ☐ ДП №4
- ☐ ДП №5
- ☐ ДП №6
- ☐ ДП №7
- ☐ ДП №8
- ☐ ДП №9
- ☐ ДП №10

Проектный период

Дутьевые параметры | Шихтовые параметры

☐ Влажность дутья, г/м³

Проект 16,263 База 16,263

☐ Температура дутья, °C

Проект 1206,787 База 1206,787

☒ Содержание кислорода в дутье, %

Проект 25 База 25,5

Справка Расчет Отмена

Рисунок 1.52 - Окно изменения параметров работы доменных печей

- влажность дутья, г/м³;
- температура дутья, °C;
- содержание кислорода в дутье, %.

В левой части окна с помощью переключателя пользователь выбирает нужную печь. Выбор параметра, который предполагается изменить в будущем для конкретной доменной печи, осуществляется установкой соответствующего флажка. Чтобы облегчить пользователю задание численных значений, рядом с полем редактирования параметра (поле «Проект») приведена величина, усредненная по реальным данным за прошедший период работы печи (поле «База»). Если пользователь задал в поле «Проект» величину, отличную от базовой, то название соответствующего дутьевого параметра для выбранной печи помечается красным цветом.

Пользователь в любой момент может отменить сделанные установки нажатием кнопки «Отмена», что приведет к закрытию этого окна без сохранения изменений. Нажатие кнопки «Расчет» вызывает выполнение процедуры оптимизации, в которой расчет будет произведен на основе новых, проектных значений дутьевых параметров. В случае успешного завершения расчета пользователю выдается соответствующее сообщение.

Пункт меню «Результаты» активизируется только после успешного выполнения расчета. Команды подменю разделены на следующие функциональные категории:

- подпункт меню «*Таблицы по цеху*» позволяет отобразить в табличном виде значения основных показателей работы всех доменных печей, участвующих в расчете. Отображение осуществляется в специальном окне, вид которого представлен на рисунке 1.53. Здесь представлены оптимальные и базовые значения выбранного показателя для каждой доменной печи, а также их абсолютные и относительные отклонения. Пользователь может в этом же окне выбрать из списка любой доступный показатель, и содержимое окна автоматически обновится;
- подпункт меню «*Диаграммы по цеху*» вызывает появление окна с графической интерпретацией полученных результатов в виде диаграммы (в соответствии с рисунком 1.54). Столбики диаграммы отображают для каждой печи базовое и оптимальное значения показателя, который выбран для показа. Пользователь может перемещаться по закладкам «Таблица» и «Диаграмма», чтобы просматривать результаты в удобном для него виде;
- подпункт меню «*Таблицы по печам*» приводит к появлению окна, в котором базовые и расчетные (оптимальные) показатели сгруппированы по отдельным печам (в соответствии с рисунком 1.55). Информация по каждой печи представлена на форме в соответствующей закладке. Если печь не участвует в расчете, то пользователю вместо результатов выдается необходимое сообщение;
- подпункт меню «*Лимитирующие параметры*» отображает пользователю в специальном окне параметры, которые влияют на предельные значения расходов природного газа в каждой доменной печи (в соответствии с рисунком 1.56). Выбор печи для представления осуществляется пользователем с помощью переключателя в левой части окна.

В окне на рисунке 1.56 предельные значения расхода природного газа рассчитаны исходя из установленных типов ограничений. Так, в представленном варианте оптимальное значение расхода природного газа на доменной печи №2 определено как максимальное в диапазоне 10000 – 15150 м³/ч. Нижний предел диапазона определяется установленным прямым ограничением на расход природного газа, а верхний – исходя из максимально допустимой температуры горения на фурмах для данной печи.

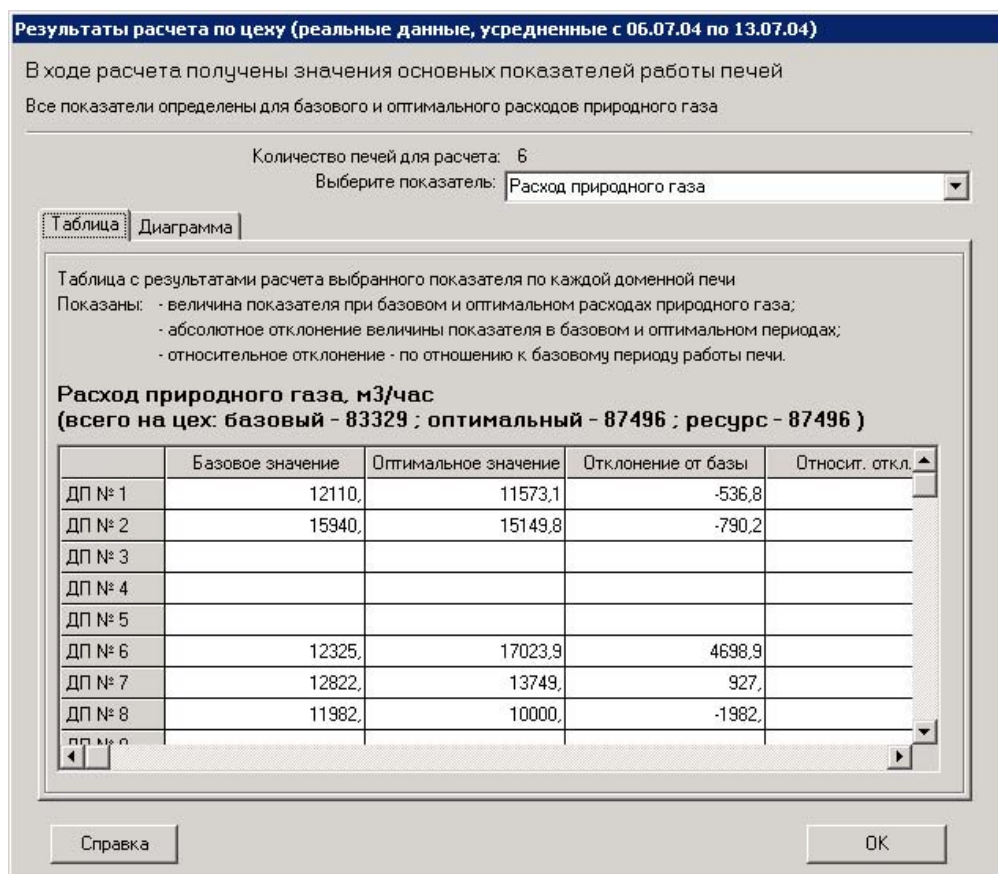


Рисунок 1.53 - Окно отображения результатов расчета в табличном виде

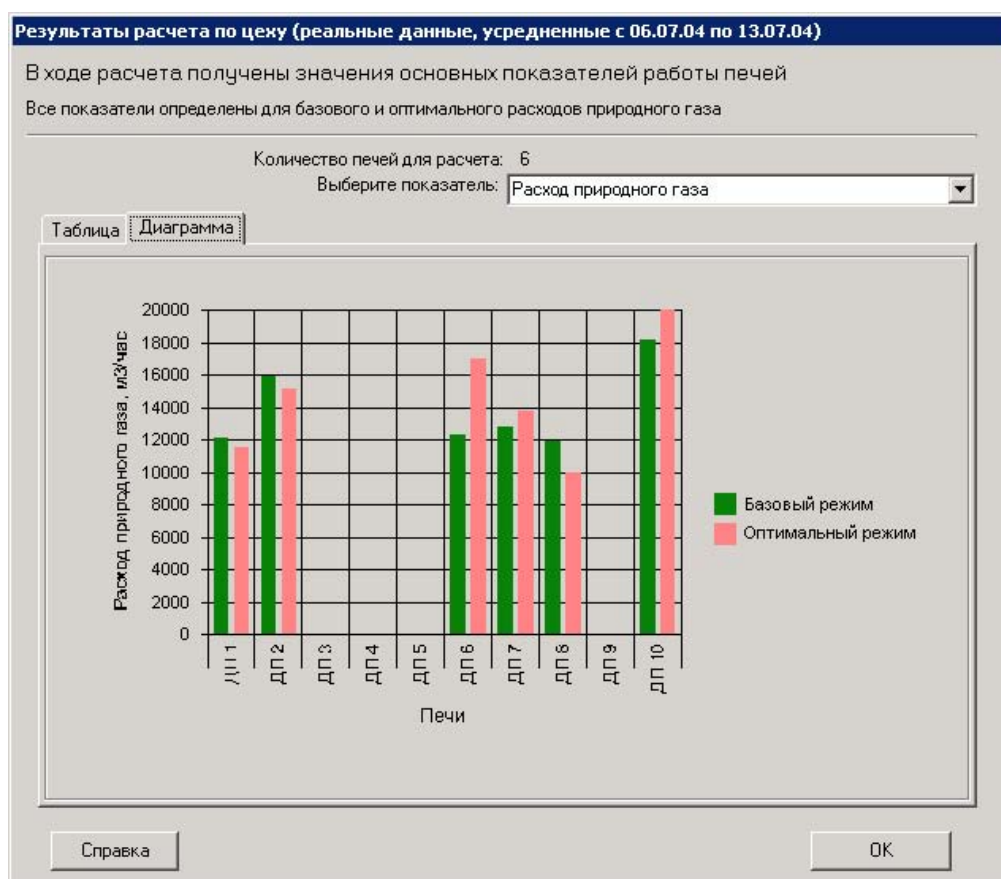


Рисунок 1.54 - Окно отображения результатов расчета в виде диаграммы

Результаты расчета по печам (реальные данные, усредненные с 06.07.04 по 13.07.04)

ДП №1 | ДП №2 | ДП №3 | ДП №4 | ДП №5 | ДП №6 | ДП №7 | ДП №8 | ДП №9 | ДП №10

ДП № 1

	Период работы печи		
	Базовый (Б)	Оптимальный (Опт)	Отклонение (Опт-Б)
Расход ПГ, м3/час	12110,	11573,	-537,
Расход кокса, т/час	68,52	68,8	,28
Производительность печи, т/час	147,74	147,27	-,47
Температура горения на фурмах, °C	2162,	2183,	21,
Содержание Si в чугуна, %	,55	,549	-,001
Содержание S в чугуна, %	,015	,0151	,0001
Уд. затраты тепла в нижней зоне, МДж/т чугуна	2973,	2963,	-10,
Отношение теплоемкостей потоков в шахте, доли	,83	,84	,
Степень уравнивания шихты, доли	,5	,5	,

Справка | Лимитирующие параметры ... | OK

Рисунок 1.55 - Окно отображения результатов расчета по печам

Лимитирующие параметры (реальные данные, усредненные с 06.07.04 по 13.07.04)

Параметры, влияющие на предельные значения расходов газа в доменной печи

Печь

☐ ДП № 1
☒ ДП № 2
☐ ДП № 3
☐ ДП № 4
☐ ДП № 5
☐ ДП № 6
☐ ДП № 7
☐ ДП № 8
☐ ДП № 9
☐ ДП № 10

Расход природного газа (ресурсы ОГРАНИЧЕНЫ), м3/час

ДП № 2 Базовый: 15940, Оптимальный:

Расход, м3/час

Предельные расходы ПГ по:

- температуре горения	нижний: <10000	верхний: 15150,
- степени уравнивания шихты	<10000	>20000
- содержанию Si в чугуна	<10000	>20000
- содержанию S в чугуна	13040,	>20000
- отношению теплоемкостей потоков	22266,	>20000

Справка | OK

Максимально допустимое значение расхода природного газа на ДП №2

Рисунок 1.56 - Окно отображения лимитирующих параметров

Пункт меню «Отчет» предназначен для формирования отчета по результатам расчета, который будет выводиться программой на печать или сохраняться во внешней памяти в текстовых форматах. Выбор данного пункта вызывает появление подменю, функциональные категории команд которого следующие:

- подпункт меню «*Просмотр*» позволяет пользователю просмотреть и настроить внешний вид отчета по своему желанию в специальном окне, представленном на рисунке 1.57. Среди основных функций можно отметить следующие:
 - возможность изменения ориентации страницы отчета (книжная или альбомная);
 - установка отображения отдельных блоков информации по исходным данным и результатам, что позволяет пользователю экономить бумагу при распечатке;
 - изменение границ полей, осуществляемое указателем мыши непосредственно в области отчета;
 - более детальный просмотр отдельных фрагментов отчета путем их увеличения с помощью специальной лупы;
 - немедленная отправка на печать настроенного документа;

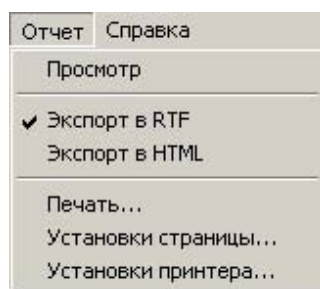


Рисунок 1.57 - Окно «отчеты»

- подпункты меню «*Экспорт в RTF*» и «*Экспорт в HTML*» осуществляют автоматический экспорт сформированного отчета в соответствующие форматы. После выполнения этих процедур пользователю выдаются сообщения с информацией об имени файла, в котором был сохранен отчет, и предложением показать сохраненный вариант отчета в соответствующей программе. Просмотр отчета RTF-формата производится в программе Microsoft Word, а просмотр HTML-формата – в окне браузера, установленного по умолчанию на компьютере пользователя;
- подпункты меню «*Печать...*», «*Установки страницы...*» и «*Установки принтера...*» вызывают стандартные диалоговые окна для более детальной настройки соответствующих функций.

1.3.5. Реализация и описание подсистемы оценки газодинамического и шлакового режимов доменной плавки

1.3.5.1 Реализация и описание подсистемы оценки газодинамического режима доменной плавки

Основные функциональные возможности. Разработанное программное обеспечение предназначено для оценки газодинамического режима доменной плавки. Данная подсистема входит в состав модельной поддержки принятия решений автоматизированной информационной системы инженерно-технологического персонала доменного цеха (АИС АППС ДЦ). Программный модуль позволяет выполнить две основные задачи:

1) диагностику газодинамического режима доменной плавки по фактическим показателям работы печи в базовом периоде: расчет газодинамических характеристик слоя шихтовых материалов, оценку скоростей фильтрации газа, изменения перепадов давления и степени уравнивания шихты, определять предельно допустимый расход дутья и критические перепады давления газа. Для базового режима в программе предусмотрен расчет показателей, представленных в диалоговом окне на рисунке 1.58.

2) прогнозирование газодинамического режима при изменении расхода дутья, параметров комбинированного дутья, параметров загружаемой шихты, уровня засыпи и давления колошникового газа (в соответствии с рисунком 1.59). Возможна любая комбинация указанных воздействий. Пользователю предоставлена возможность корректировки гранулометрического состава агломерата и кокса через изменение процентного состава различных фракций в специальном диалоговом окне (в соответствии с рисунком 1.60).

Результаты моделирования. Результаты моделирования газодинамики доменной печи для прогнозного режима отображаются в табличной и графической формах (в соответствии с рисунками 1.61 и 1.62).

На рисунке 1.61 представлены количественные результаты модельных расчетов параметров газодинамики доменной плавки при дополнительном обогащении воздушного дутья кислородом на 1 % (с 25 до 26 %). На представленной форме показано, что влияние дутьевых параметров приводит к снижению верхнего перепада давления в доменной печи на 2,3% (с 0,432 до 0,422 атм) и нижнего перепада давления на 2,9% (с 1,008 до 0,978 атм). Общий перепад давления по высоте в прогнозном режиме снизится на 2,8 % (с 1,44 до 1,40 атм), величина минутного расхода дутья увеличится на 1,4 % (с 2997 до 3039,5 м³/мин.). При этом предполагается получить прирост производительности выплавки чугуна на 1,42 %.

Результаты расчета для базового режима

График Таблица

Перепад давления, атм.:

- верхний: 1,432
- нижний: 1,008
- общий: 1,44

Скорость фильтрации газа в области горна, м/с:

- при нормальных условиях: 1,57
- действительная: 7,46

Скорость фильтрации газа в области распара, м/с:

- при нормальных условиях: 1,24
- действительная: 6,02

Скорость фильтрации газа через колошник, м/с:

- при нормальных условиях: 2,48
- действительная: 5,82

Степень уравнивания шихты, %: 53,79

Расход дутья, м3/мин.:

- по показаниям КИП: 2997,
- критический: 3030,6

Расход дутья, м3/мин.	0	299,7	599,4	899,1	1198,8	1498,5	1798,2	2097,9	2397,6	2697,3	2997	3296,7
Перепад давления, атм.	0	,014	,058	,13	,23	,36	,518	,706	,922	1,166	1,44	1,742

Температура горения, °C: 1985

Газодинамические параметры

Рабочая точка: Критическая точка:

Перепад давления, атм.: 1,44 Перепад давления, атм.: 1,47

Расход дутья, м3/мин.: 2997, Расход дутья, м3/мин.: 3030

OK

Рисунок 1.58 - Отображение параметров газодинамического режима для базового варианта расчета

Влияние параметров на газодинамический режим печи

Засыпь

☐ Уровень засыпки

База: 1,1 Прогноз:

Агломерат

☐ Гранулометрический состав

Эквивалентный диаметр куска, мм: База: 77 Прогноз:

Порозность слоя, м3/м3: База: 301 Прогноз:

Кокс

☐ Гранулометрический состав

Эквивалентный диаметр куска, мм: База: 547 Прогноз:

Порозность слоя, м3/м3: База: 36 Прогноз:

Дутьевые параметры

☒ Перепад давления в области горна

Расход природного газа, м3/т чугуна: База: 105 Прогноз: 105

Содержание кислорода в дутье, %: База: 24 Прогноз: 25

Температура дутья, °C: База: 1140 Прогноз: 1140

Влажность дутья, г/м3: База: 6,36 Прогноз: 6,36

Колошниковый газ

☐ Давление, атм: База: 1,4 Прогноз:

Шлак

☐ Удельный выход, кг/т чугуна: База: 133 Прогноз:

OK

Рисунок 1.59 - Окно настройки параметров для прогноза

Корректировка гранулометрического состава агломерата

Размер фракции, мм	> 50	50 - 25	25 - 10	10 - 5	< 5	
Содержание фракции, %	База	8,1	5,7	32,5	40,1	13,6
	Прогноз	8,1	5,7	32,5	40,1	13,6

Невязка по содержанию фракции, %: 0,00

OK

Рисунок 1.60 - Окно для изменения гранулометрического состава агломерата

Результаты расчета для прогнозного режима

График Таблица

	Верхний перепад давления, атм	Нижний перепад давления, атм	Общий перепад давления, атм	Расход дутья, м ³ /мин	Приrost производительности, %
Базовое значение	.432	1.008	1.44	2997	
Влияние параметров:					
- уровень газификации					
- гранулометрический состав					
- дутьевые параметры	.422	.978	1.4	3039.5	1.42
- давление колошника обогатителя					
- дробильный выход агломерата					
Итоговое значение	.422	.978	1.4	3039.5	1.42

Газодинамические параметры

Рабочая точка

Перепад давления, атм: 1.44

Расход дутья, м³/мин: 2997

Температура горения, °C

Базовый режим: 1995

Прогнозный режим: 2010

OK

Рисунок 1.61 - Результаты расчета влияния увеличения содержания кислорода в дутье на 1 %

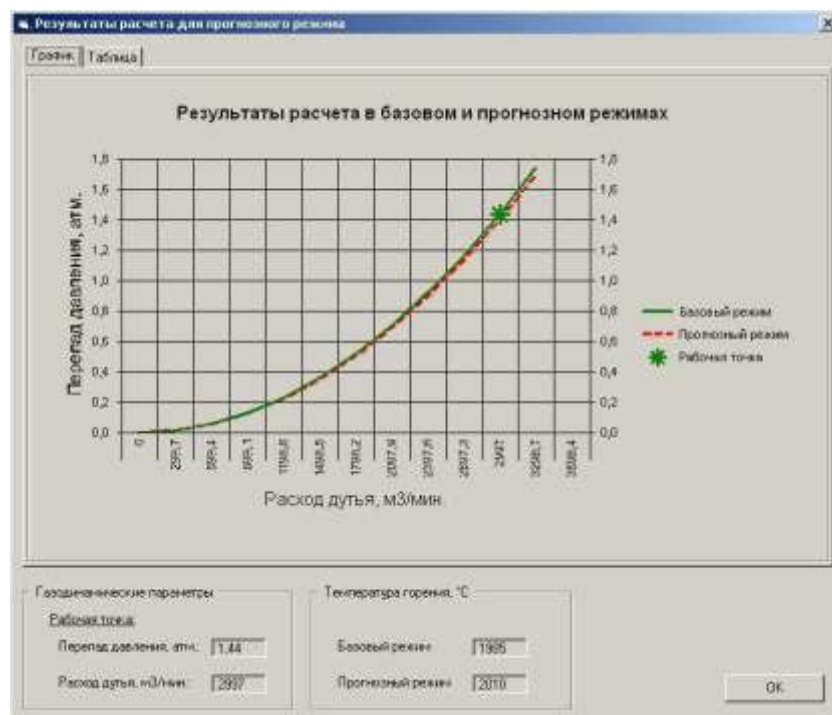


Рисунок 1.62 - Графическое представление результатов расчета

Результаты отображения графической зависимости позволяют в наглядной форме продемонстрировать изменение зависимости перепада давления по высоте печи от минутного расхода дутья с целью оценки возможности предельно допустимой степени форсировки доменной плавки дутьем в прогнозном режиме. Так, результаты, представленные на рисунке 1.62, свидетельствуют о снижении величины предельно допустимого расхода дутья в прогнозном режиме для данного варианта расчета, при котором будет достигнут критический перепад давления по высоте печи, превышение которого будет сопровождаться подвисаниями и обрывами шихты (неровным ходом). Дополнительно на форме отображены численные значения параметров рабочей точки базового периода (перепада давления, минутного расхода дутья), а также температуры горения в базовом и прогнозном режимах.

1.3.5.2 Реализация и описание подсистемы оценки шлакового режима доменной плавки

Архитектура системы. Процесс создания архитектуры программного модуля оценки шлакового режима доменной плавки проводили на основе следующих принципов:

1. Полнота.
2. Ответственность.

Принцип полноты архитектуры означает то обстоятельство, что в ней должны быть определены подсистемы (классы), реализующие все высокоуровневые функции программы, в частности, взаимодействие с пользователем, доступ к данным, отображение результатов расчетов, инкапсуляция (скрытие) методики расчета параметров шлакового режима доменной плавки. Это позволяет локализовать информацию о системе в отдельных подсистемах. Архитектура подсистемы оценки шлакового режима доменной плавки изображена на рисунке 1.63.

Согласно второму принципу все подсистемы должны иметь свою зону ответственности и как можно меньше «знать» об областях ответственности других классов.

Реализация программного модуля оценки шлакового режима [20]. Реализация программного модуля осуществлена в виде динамически подключаемой библиотеки (Forecast.dll) последовательным выполнением следующих этапов:

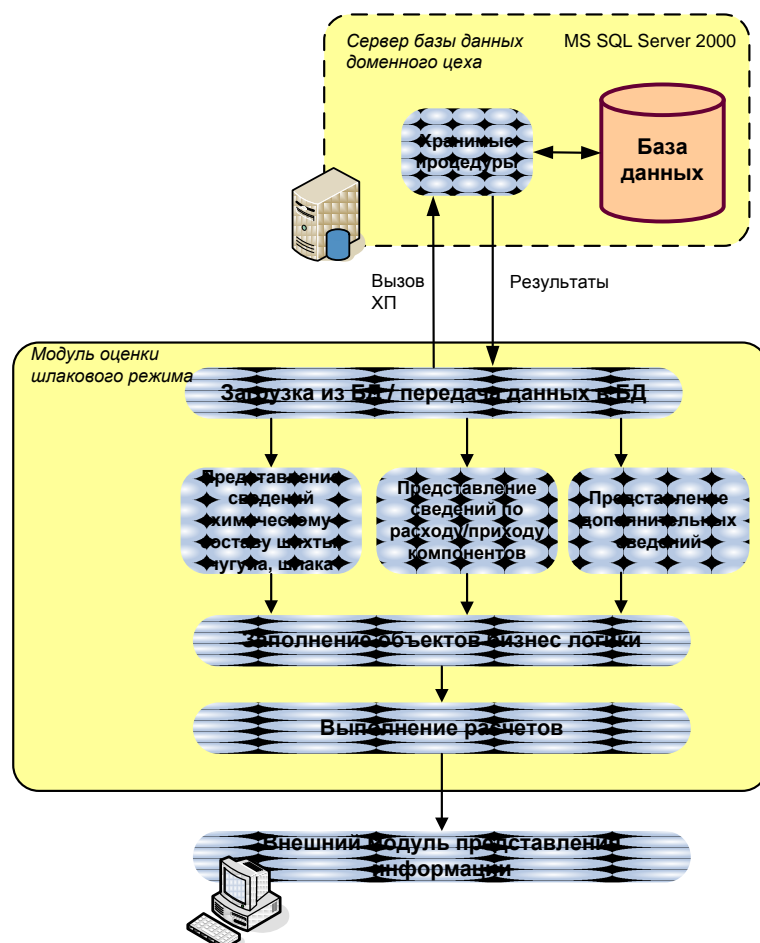


Рисунок 1.63 - Архитектура программного модуля оценки шлакового режима

- разработки структуры программного модуля на основе созданной архитектуры;
- подготовки отладочных тестов и проведение на основе их автоматического тестирования библиотеки.

Структура библиотеки Forecast. Разработка структуры модуля проведена с использованием объектно-ориентированного подхода, который выбран исходя из необходимости создания, во-первых, программных классов, адекватно моделирующих шлаковый режим доменной плавки; во-вторых, универсального и легко расширяемого программного модуля. Основу структуры составляют четыре базовых направления:

- компоненты (Components);
- составные части (Ingredients);
- наложение (Mapping);
- параметры (Performance).

В соответствии этим направлениям в среде программирования Microsoft Visual Studio.NET (C#) было созданы соответствующие пространства имен (username).

1. *Пространство имен «Компоненты» (Components)*. Класс Component моделирует химический состав элемента шихты. В основе класса Component лежит объект Dictionary<String, Double>, где содержится список параметров: название соединения или химического элемента (например, CaO, SiO₂, MgO и др.) и его величина. Все компоненты разделены на два подкласса:

- компоненты, загружаемые в печь (ComponentIn):
 - флюсы (ComponentFlux);
 - кокс (ComponentCoke);
 - ЖРМ (ComponentGRM);
- компоненты жидких продуктов плавки (ComponentOut):
 - чугун (ComponentIron);
 - шлак (ComponentSlag).

На рисунке 1.64 показана диаграмма наследования типа Components.

—

Рисунок 1.64 - Диаграмма наследования типа Components

Помимо химического состава каждый компонент содержит два обязательных поля:

- имя (Name) – содержит информацию об источнике, например, "Руда Михайловская";
- расход (Debit) – для загружаемых компонентов;
- выход (Credit) – для получаемых компонентов.

Поля «Расход» и «Выход» необходимы для проведения математических расчетов.

2. *Пространство имен «Составные части» (Ingridients)*. Предполагается, что составные части состоят из компонентов, поступающих в печь. Поэтому в основе класса лежит объект List<ComponentIn>. Здесь можно выделить три основных типа:

- ЖРМ (GRM);
- кокс (Coke);
- флюсы (Flux).

Каждая из этих сущностей содержит список соответствующих ей компонентов, например, GRM содержит список ComponentGRM. На рисунке 1.65 продемонстрирована диаграмма наследования типа Ingredient.

...

Рисунок 1.65 - Диаграмма наследования типа Ingredient

3. *Пространство имен «Наложение» (Mapping).* Данное пространство имен содержит классы, главной задачей которых является взаимодействие с источником данных (базой данных), в результате которого должны быть заполнены экземпляры всех объектов: ЖРМ, кокса, флюсов, чугуна и шлака. В частности, должны быть получены фактические отчетные данные о химическом составе этих компонентов, а также ряд дополнительных параметров, необходимых для расчета (например, расходы компонентов, поступающих в печь). В пространство имен «Наложение» входит два класса:

- Mapper;
- ComponentAttributes.

Mapper – это статический класс, который непосредственно взаимодействует с источником данных. В среде Microsoft Visual Studio (C#) реализовали три различных метода получения данных:

1) получением компонентов, поступающих в печь. Сигнатура метода:

```
public static List<T> GetListComponentIn<T>(
    String Mnemo,
    DateTime dtCurr,
    DateTime dtPrev,
    Int32 IsCompare,
    Int32 year,
    Int32 debug) where T:ComponentIn
```

Следует отметить, что параметр <T> отражает тип компонента, который необходимо заполнить. Метод работает следующим образом: из справочной таблиц базы данных извлекаются все возможные компоненты, относящиеся к указанному типу. Далее осуществляется проверка

загружался ли указанный материал в печь в указанный период. Если этот материал загружался, то производится заполнение отчетными данными путем вызова хранимой процедуры для указанного материала. В результате формируется список всех компонентов за указанный период с фактическими данными о химическом составе, расходе и пр.

2) получение компонентов, выходящих из печи. Сигнатура метода:

```
public static List<T> GetListComponentOut<T>(  
    DateTime dtCurr,  
    DateTime dtPrev,  
    Int32 isCompare,  
    Int32 year,  
    Int32 debug,  
    Int32 InPechNum) where T:ComponentOut
```

В силу особенности базы данных данный метод работает совсем по-другому: химический состав статически заложен в программу. Заполнение фактическими отчетными данными происходит путем вызова хранимой процедуры для каждого элемента химического состава необходимого компонента.

3) получение указанного параметра. Сигнатура метода:

```
public static Boolean GetPerformance(CommonPerformance InOutPerformance)
```

Здесь вызывается хранимая процедура с параметрами, переданными в объекте типа CommonPerformance.

Таким образом, созданный статический класс Mapper является универсальным способом доступа к источнику данных. В ходе работы программы он реализует один из базовых принципов объектно-ориентированного программирования – полиформизм, позволяя в зависимости от ситуации использовать наиболее удобный метод доступа к данным.

Второй метод ComponentAttributes является вспомогательным классом, который является своего рода проекцией на таблицу из базы данных. Он описывает поля, характеризующие компоненты шихты: код материала; имя материала; тип материала. В базе данных доменного цеха использованы следующие номенклатурные типы материалов: агломерат, окатыши, флюсы, металлдобавки, ЖРМ, топливо, зола, отходы.

4. *Пространство имен «Параметры» (Performance)*. Данное пространство имен содержит классы, которые моделируют параметры компонентов. Все параметры разделены на два подкласса:

- технические параметры (TechPerformance) – отчетные (ReportTechPerformance) и сравниваемые (CompareTechPerformance);

- параметры расхода (DebitPerformance) – отчетные (ReportDebitPerformance) и сравниваемые (CompareDebitPerformance).

На рисунке 1.66 проиллюстрирована диаграмма наследования типа Performance.

...

Рисунок 1.66 - Диаграмма наследования типа Performance

Необходимо также использовать тип DebitValue, который содержит три поля:

- наименование;
- дата;
- величина.

Типы классов с префиксом Report содержат по одному экземпляру DebitValue, в которых хранится отчетная величина параметра. В типах с префиксом Compare к существующему параметру Report добавляется еще один параметр – Compare, в котором содержатся данные в сравнительном периоде. Кроме указанных элементов в объектах наследниках от CommonPerformance содержится еще ряд дополнительных параметров:

- имя Name – имя параметра;
- годовой IsYear – параметр за год;
- отладочный IsDebug – отладочный вызов;
- номер печи PechNum.

Таким образом, показанные направления Components, Ingridients, Mapping и Performance в виде классов реализуют всю необходимую функциональность программного модуля оценки шлакового режима доменной плавки. Итоговый модуль реализован в виде динамически подключаемой библиотеки forecast.dll, скомпилированной для операционной платформы Windows.

Основные функциональные возможности. Разработанное программное обеспечение предназначено для оценки шлакового режима доменной плавки. Данная подсистема входит в состав модельной поддержки принятия решений автоматизированной информационной системы

инженерно-технологического персонала доменного цеха (АИС АППС ДЦ). Программный модуль предназначен для решения следующих технологических задач:

- 1) оценки свойства шлака при заданных расходах, составах железорудных компонентов доменной шихты, флюсующих материалов и параметров процесса;
 - 2) расчета требуемого расхода одного из флюсующих материалов при изменении сырьевых условий и параметров процесса для получения шлака с заданными свойствами;
 - 3) определения требуемого соотношения компонентов железорудной части шихты при изменении сырьевых условий и параметров процесса для получения доменного шлака с заданными свойствами.
- В главном окне программы пункт меню «Настройка» предусмотрен для ввода и корректировки нормативно-справочной информации и настройки пакета для различных диапазонов составов шлака, а также для диагностики шлакового режима. При выполнении расчетов пользователем выбирается базовый период, для которого имеется информация о составе проплавляемого сырья и параметрах плавки (в соответствии с рисунками 1.67, 1.68).

Расчет шлакового режима доменной плавки

Файл Настройка

Базовый режим | Проектный режим | Сопоставление

Исходные данные | Расход ЖРМ и флюсов | Технологические показатели подачи | Результат

Показатели работы печи		Параметры дутья		Свойства кокса	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Среднесуточное производство	3615,6	Расход дутья, м ³ /мин	1270	Прочность кокса по М25, %	85,5
Масса ЖРМ в подаче, кг	28000	Температура дутья, °С	1193	Истираемость кокса по М10, %	7,9
Рудная нагрузка, т/т	3,66	Давление дутья, ати	2,69	Горячая прочность кокса, %	62
Температура чугуна, °С	1450	Содержание кислорода, %	24,8	Реакционная способность кокса, %	26
		Расход природного газа, м ³ /мин	93,8	Содержание фракций >80мм, %	24
		Влажность дутья, г/м ³	12,8		

Состав чугуна, %		Состав шлака, %		Состав кокса, %		Состав золы кокса, %	
Fe	94,0	CaO	39,7	Зола (А)	11,9	Fe	5,40
C	4,70	SiO ₂	37,3	Сера (Sk)	0,49	FeO	6,94
Si	0,51	Al ₂ O ₃	11,43	Летучие	0,99	CaO	7,80
S	0,02	MgO	7,93	Снел	86,62	SiO ₂	48,10
		TiO ₂	0,936			Al ₂ O ₃	24,60
		S	0,81			MgO	2,00
		CaO/SiO ₂	1,06			TiO ₂	0
						S	0

Рисунок 1.67 - Таблицы для ввода параметров процесса в базовом периоде работы печи

Расчет шлакового режима доменной плавки

Файл Настройка

Базовый режим Проектный режим Сопоставление

Исходные данные Расход ЖРМ и флюсов Технологические показатели подачи Результат

ЖРМ

Наименование	Доля	Fe	FeO	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	TiO2	S
Агл.а/ф №2,3	0,267	58,5	12,5	8,72	5,88	1,75	1,63	0,24	0,028
Агл.а/ф №4	0,294	58,3	12,7	8,86	5,95	1,76	1,64	0,24	0,028
Окат.ССГПО	0,344	62,6	1,6	4,02	3,7	1,21	0,99	0,32	0,067
Окат.Михайл.	0,095	63,3	0,94	1,49	7,25	0,23	0,25	0	0,010
Агломерат 1	0	57,81	12,7	8,84	5,98	1,69	1,95	0,22	0,05
Агломерат 2	0	57,1	12,1	7,72	6,77	2,18	2,26	2,93	0,05
Агломерат 3	0	57,2	7,94	4,54	4,64	2,49	2,14	2,26	0,05
Агломерат 4	0	57,82	7,94	0,54	8,64	2,49	2,14	2,26	0,05
Окатыши 1	0	62,6	1,6	4,02	3,7	1,21	0,99	0,32	0,05
Итого ЖРМ	1,0								

Флюсы

Наименование	Расход	Fe	FeO	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	TiO2	S
Известняк	0	0	0	51,0	0,8	0,05	3,5	0	0
Резерв	0	0	0	51,8	0,17	0,05	3,2	0	0
Кварцит	50	0	0	0	94,0	1,0	0	0	0

Рисунок 1.68 - Таблицы для ввода состава шихты в базовом периоде работы печи

В результате выполненных расчетов определяются состав продуктов плавки и свойства шлака:

- вязкости шлака при температурах 1400, 1450, 1500 °С;
- политермы вязкости;
- температуры шлака;
- вязкости шлака при его температуре;
- градиента вязкости шлака в интервале 7–25 пуаз;
- параметры, характеризующие десульфuriрующую способность шлака: основность; коэффициент активности; масса серы, вносимая в печь; коэффициент распределения серы.

Фрагмент результатов расчета шлакового режима доменной плавки представлен на рисунке 1.69.

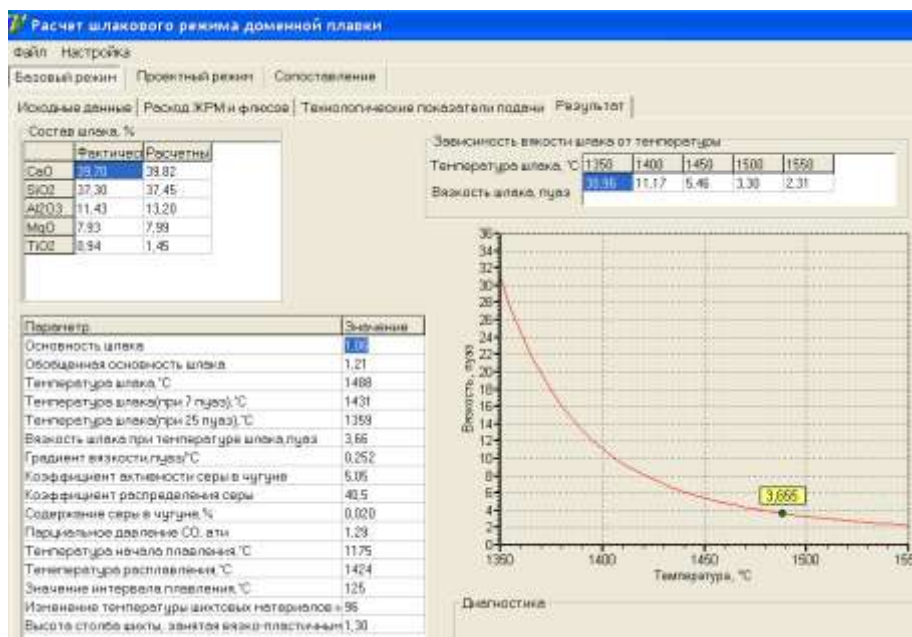


Рисунок 1.69 - Фрагмент отображения результатов расчета шлакового режима

Для проектного режима в режиме диалога пользователь может рассчитать комплекс параметров, характеризующих шлаковый режим, прогнозировать состав шлака, содержание серы в чугуне, выполнять диагностику шлакового режима при изменении состава шихты, качества кокса, дутьевых параметров. Ввод параметров шихты, результаты расчета шлакового режима в проектный период представлены на формах, аналогичных расчету шлакового режима в базовом периоде.

Для оперативного анализа изменения технико-экономических показателей плавки и шлакового режима в проектный период относительно базовых данных представлены на одной экранной форме с помощью кнопки «Сопоставление» (в соответствии с рисунком 1.70).

Все полученные результаты могут быть сохранены в отчет и экспортированы во внешний файл формата офисных документов.

Результаты внедрения АИС АППС ДЦ позволят:

1. Повысить качество производимой продукции доменного цеха за счет повышения оперативности работы технологической группы и сокращения времени анализа качественных и количественных показателей доменного производства.
2. Предоставить детализированную информацию о ходе технологического процесса выплавки чугуна для оценки его экономической эффективности.
3. Предоставить фактические данные о состоянии печей и оборудования доменного цеха, оперативно сформировать необходимый комплект отчетной документации.
4. Сократить время поиска необходимой отчетной информации для проведения сопоставительного анализа работы доменного цеха в разные периоды за счет реализации

централизованной структуры хранения отчетных данных и дружественного интерфейса программного обеспечения клиентских приложений.

5. Повысить культуру управления производством, улучшить условия труда и информированность оперативного и производственного персонала доменного цеха.
6. Создать условия для последующего совершенствования и развития системы.

Расчет шлакового режима доменной плавки			
Файл Настройка			
Базовый режим Проектный режим Сопоставление			
Параметр	Базовый период	Проектный период	Изменение периода
содержание кислорода в дутье, %	24,80	24,80	0
расход природного газа, м3/т чуг	93,80	95,40	1,6
Состав чугуна, %			
[Fe]	94,00	94,00	0
[C]	4,70	4,70	0
[Si]	0,51	0,51	0
[S]	0,020	0,015	-0,005
Температура чугуна, °C	1450	1450	0
Температура начала плавления, °C	1175	1185	10
Температура расплавления, °C	1424	1421	-3
Значение интервала плавления, °C	125	118	-7
Изменение температуры шихтовых материалов на 1м высоте	96	96	0
Высота столба шихты, занятая вязко-пластичными материалами	1,30	1,23	-0,07
Характеристики шлака			
Основность	1,06	1,10	0,04
Обобщенная основность	1,21	1,24	0,03
Температура шлака, °C	1488	1488	0
Расчетный выход шлака, кг/т чуг	261,90	276,73	14,83
Вязкость шлака при температуре шлака, пцаз	3,66	3,08	-0,58
Вязкость шлака при температурах, пцаз			
Температура шлака при вязкости 7 пцаз, °C	1431	1421	-10
Температура шлака при вязкости 25 пцаз, °C	1359	1360	1
Градиент вязкости, пцаз/град	0,252	0,292	0,04
Коэффициент активности серы в чугуне	5,05	5,05	0
Коэффициент распределения серы	40,5	49,6	9,1

Рисунок 1.70 - Сопоставление параметров и показателей шлакового режима

1.4. Список использованных источников

1. *Андронов В.Н.* Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 377 с.
2. *Атлас шлаков.* Перевод с немецкого Жмойдина Г.И. / Под ред. Куликова И.С. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
3. *Балон И.Д.* Фазовые превращения материалов при доменной плавке / И.Д.Балон, И.З.Буклан, В.Н.Муравьев, Ю.Ф.Никулин // М.: Металлургия, 1984. – 152 с.
4. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. – К.: Наукова думка, 2007. – 411 с.
5. *Вегман Е.Ф.* Доменное производство: Справочное издание. Т.1 Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф.Вегмана // М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
6. *Воскобойников В.Г.* Свойства жидких доменных шлаков / В.Г.Воскобойников, Н.Е.Дунаев, А.Г.Михалевич // М.: Металлургия, 1975. – 182 с.
7. *Гиммельфарб А.А.* Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах / А.А.Гиммельфарб, К.И.Котов // М.: Металлургия, 1982. – 328 с.
8. *Дмитриев А.Н.* Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С.Шумаков, Л.И.Леонтьев, О.П.Онорин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 547 с.
9. *Емельянов С.В.* Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В.Емельянов, С.К.Коровин, Л.П.Мышляев, А.С.Рыков, В.Ф.Евтушенко, С.М.Кулаков, Н.Ф.Бондарь – Кемерово; М.: Издат. объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2008. – 487 с.
10. *Жило Н.Л.* Формирование и свойства доменных шлаков / Н.Л.Жило // М.: Металлургия, 1974. – 120 с.
11. *Китаев Б.И.* Теплотехника доменного процесса / Б.И.Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Е.Л.Суханов, Ю.Н.Овчинников, В.С.Швыдкий // М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
12. *Куликов И.С.* Десульфурация чугуна / И.С.Куликов // М.: Металлургия, 1962. – 306 с.
13. *Курунов И.Ф.* Влияние качества кокса на показатели работы доменных печей /Курунов И.Ф., Емельянов В.Л., Титов В.Н. – Металлург, 2007, № 12. – С.37–39.
14. *Курунов И.Ф.* Состояние и развитие доменного производства в Китае, Японии, Северной Америке, Западной Европе и России // Сталь, 2010, № 4. – С. 11.
15. *Леонтьев Л.И.* Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И.Леонтьев, Н.А.Ватолин, С.В.Шаврин, Н.С.Шумаков // М.: Металлургия, 1997. – 432 с.
16. *Онорин О.П.* Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П.Онорин, Н.А.Спирин, В.Л.Терентьев, Л.Ю.Гилева, В.Ю.Рыболовлев, И.Е.Косаченко, В.В.Лавров, А.В.Терентьев; под ред. Н.А.Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.

17. Пузанов В.П. Введение в технологии металлургического структурообразования / В.П.Пузанов, В.А.Кобелев / Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 501 с.
18. Рамм А.Н. Современный доменный процесс / А.Н.Рамм // М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
19. Спирин Н.А. Информационные системы в металлургии // Н.А.Спирин, Ю.В.Ипатов, В.И.Лобанов, В.А.Краснобаев, В.В.Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С.Швыдкий, С.А.Загайнов, О.П.Онорин. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
20. Спирин Н.А. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Екатеринбург: УрФУ, 2011. -462 с.
21. Спирин Н.А. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А.Спирин, В.В.Лавров, С.И.Паршаков, С.Г.Денисенко // Екатеринбург, УГТУ–УПИ, 2006. – 307 с.
22. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса / В.П.Тарасов // М.: Металлургия, 1982. – 222 с.
23. Товаровский И.Г. Доменная плавка. – Днепропетровск: Пороги, 2009. –765 с.
24. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии / В.П.Цымбал // Кемерово; М.: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2006. – 431 с.
25. Ченцов А.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / А.В.Ченцов, Ю.А.Чесноков, С.В.Шаврин // М.: Наука, 1991. – 92 с.
26. Юсфин Ю.С. Металлургия железа / Ю.С.Юсфин, Н.Ф.Пашков. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
27. Юсфин Ю.С. Металлургия чугуна / Под ред. Ю.С.Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.

2. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОВМЕЩЕННЫМ ПРОЦЕССОМ ПРЕССОВАНИЯ-ПРОКАТКИ- РЕГЛАМЕНТИРОВАННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ

Для изготовления теплообменных труб и труб, применяемых в качестве оболочек ТВЭЛов, работающих в условиях радиоактивного нейтронного облучения в среде расплавов щелочных металлов, применяются коррозионностойкие стали аустенитного класса с низким содержанием углерода (0,02...0,03%). Такие стали в меньшей степени подвержены распуханию и достаточно хорошо сопротивляются межкристаллитной коррозии.

Предлагаемый комплекс оборудования и новая технология производства заготовок труб для ТВЭЛов при достаточно малых затратах решает проблему поставок низкоуглеродистой нержавеющей стали, изготавливаемой из собственной металлургической окалины, накапливаемой в отвалах и частично сбываемой по явно заниженной цене. Сухая окалина имеет удовлетворительный сбыт, а замасленная вообще не рассматривается как товарный продукт и не перерабатывается самим предприятием.

Важным достоинством металлургической окалины, представляющей совокупность окислов железа, следует считать полное отсутствие в её химическом составе углерода. Предлагаемая технология включает безуглеродное жидкофазное восстановление железа из окислов и малотоннажную выплавку низкоуглеродистой нержавеющей стали высокого качества, пригодной для производства труб оболочек ТВЭЛов с высоким уровнем повреждающей дозы нейтронного облучения (до 120...150 сна).

Примерный план расположения оборудования комплекса, иллюстрирующий новую технологию, показан на рисунке 2.1. В качестве исходного сырья используется как сухая, так и замасленная окалины, подаваемая в бункеры участка шихтоподготовки. Замасленная окалина подвергается обезмасливанию обжигом в факеле природного газа, сжигаемого с недостатком кислорода. Образующийся пиролизный газ дожигается, и продукты горения в дальнейшем используются для ускоренной просушки брикетов окалины. Обезмасленная окалины смешивается с сухой и с наполнителями, в качестве которых с равным технологическим успехом могут использоваться жидкое стекло и известь. Смесь подается в валковый брикетировочный пресс, в котором формируются брикеты окалины умеренной плотности и прочности, но достаточных для подачи в плавильный агрегат жидкофазного восстановления. Просушенные углекислым газом брикеты подаются в плавильную ёмкость агрегата, в котором предварительно наводится «болото» из ферроалюминия. Для производства последнего задействуется индукционная плавильная печь. После расплавления алюминия в расплав подается стальная низкоуглеродистая обрезь труб

собственного производства. Концентрация железа в ферроалюминии составляет 30...40%, а расход алюминия приблизительно 400 кг на тонну выплавляемой из окалины стали. На одну тонну готовой стали расходуется 1250 кг окалины.

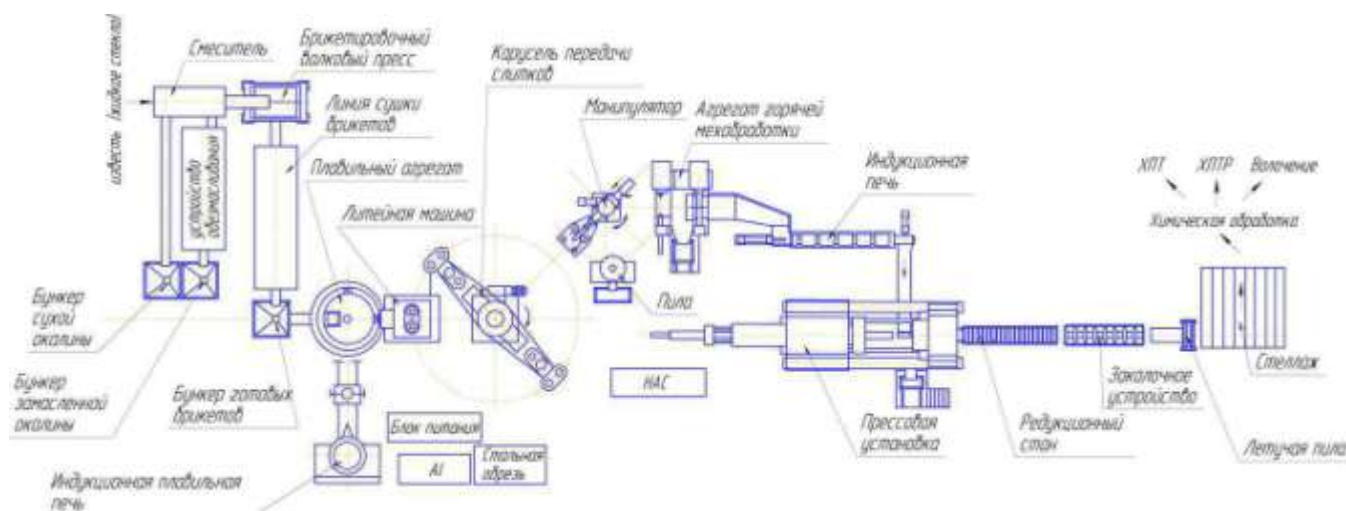


Рисунок 2.1 - План расположения оборудования комплекса для производства теплообменных труб из коррозионно-стойкой стали

Основной плавильный агрегат индукционного нагрева в донной части плавильного тигля снабжен электромагнитным вращателем, работающим на низкой частоте (1,5...4 Гц) и обеспечивающим вращение расплава в тигле с образованием мениска параболической формы. В подогретый тигель плавильного агрегата первоначально заливается расплав ферроалюминия, расплаву придается вращение, и в параболическую лунку подаются брикеты окалины. Восстановление железа осуществляется в данном случае алюминием в экзотермической реакции. В итоге, без дополнительного подвода энергии из окалины с высокой производительностью, с высоким коэффициентом извлечения железа (до 99,8%) выплавляется низкоуглеродистая сталь, которая легируется чистым хромом, ферроникелем и ферротитаном. Растворение легирующих происходит быстро за счёт активного перемешивания расплава и большой площади границы раздела шлак-металл. Учитывая высокую стоимость продукции комплекса вполне допустимо использовать в качестве шлакообразующего плавиковый шпат (CaF_2). При использовании для формирования шлака извести и кремнезёма, как в традиционной плавке жидкофазного восстановления, возможно безотходное сталеплавильное производство, поскольку легко обеспечить стехиометрию шлака, соответствующего клинкеру глинозёмистого цемента. В этом случае выполняется регламентированное соотношение компонентов шлака $\text{CuO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Качество глинозёмистого цемента высокое при отсутствии в нём оксидов железа.

Шлак удаляется из тигля плавильного агрегата эжекционным отсосом, а расплав стали сифонным способом передается в рабочую ёмкость литейной машины.

Следует учитывать важное обстоятельство обеспечения длительной работоспособности тиглей плавильного агрегата. При вращении расплава жидкий металл поднимается по стенкам футеровки тигля и обеспечивает изоляцию огнеупора от агрессивного воздействия шлака.

В литейной машине формирование полой прессовой заготовки осуществляется методом намораживания расплава нержавеющей стали на трубчатый водоохлаждаемый кристаллизатор, изготовленный из той же марки нержавеющей стали и в дальнейшем являющийся частью слитка. Намораживание металла на кристаллизатор проводится при циклическом движении расплава вдоль фронта кристаллизации, обеспечиваемом регулированием частоты тока питания электромагнитного вращателя. При разливке температура расплава стабилизируется за счёт перемешивания и автоматического управления индуктором плавильной ёмкости печи. После формирования слитка заданного диаметра он извлекается вверх из литейной машины с калибровкой наружной поверхности протяжкой через графитовое кольцо. Слиток или несколько одновременно формируемых слитков каруселью передаётся на участок механической обработки, где после пильной отрезки концевых частей слиток устанавливается с зацентровкой по трубе-кристаллизатору на токарном станке и протачивается по наружному диаметру. При таком способе мехобработки гарантируется строгая коаксиальность полого слитка.

Слитки подвергаются нагреву или подогреву в проходной индукционной печи и с заданным темпом подаются в контейнер трубопрофильного пресса прямого прессования полых заготовок.

По оси пресса установлен непрерывный редуционно-растяжной стан с индивидуальным гидроприводом четырёхвалковых клеток. Скоростной режим работы стана согласуется с работой пресса, а тепло прессового передела эффективно используется при горячей редуционной прокатке. Межклетевые натяжения заданного уровня обеспечиваются достаточно дешёвыми аппаратными средствами гидроуправления. Согласование скоростей индивидуально приводимых валков каждой клетки обеспечивается не механическими системами, которым свойственны люфты и создание асимметрии очага деформации при прокатке, а серийно производимыми делителями и сумматорами потоков. Редуционно-растяжная прокатка позволяет в широком диапазоне варьировать диаметр и толщину стенки трубы и, следовательно, готовить трубную заготовку сразу под финишную обработку, даже минуя ХПТ, на ХПТР или волочильных станах.

Трубопрофильный пресс за счёт управления положением оправки (иглы) позволяет прессовать трубную заготовку с конусовыми пробками, которые после ускоренного охлаждения катаной трубы удаляются вместе с утолщенными концами трубы. Охлаждение труб из аустенитных сталей рассматривается в данном случае как операция закалки, а требуемая температура трубы на выходе из стана обеспечивается как исходным нагревом в индукционной печи прессовых заготовок, так и управлением скоростью прессования. При прессовании труб из полой заготовки с качественной внутренней поверхностью и при отсутствии исходной

разностенности гарантируется отсутствие надрывов внутренней поверхности трубы, характерных для процесса прессовой прошивки сплошных заготовок, и получение как прессованных, так и горячекатаных из трубных заготовок практически без разностенности.

Основными достоинствами предлагаемой технологии являются:

- эффективная утилизация всех видов металлургической окалины;
- возможность выплавки нержавеющей аустенитной стали с малым содержанием углерода;
- экзотермическая реакция восстановления железа за счёт применения металлического восстановителя;
- безотходность сталеплавильного передела и получение кроме стали дополнительного товарного продукта в виде клинкера глинозёмистого или высокоглинозёмистого цемента;
- длительная кампания футеровки плавильного тигля благодаря металлической изоляции огнеупоров от агрессивных шлаков;
- стабилизация температурного режима плавки, активное перемешивание, большая площадь контакта шлака с металлом, быстрое и равномерное растворение легирующих и ферросплавов за счёт вращения расплава;
- минимальное газовыделение при восстановлении железа алюминием;
- возможность получения полого плотного слитка с качественной внутренней поверхностью, полное подавление ликвации легирующих элементов и примесей при послойном намораживании слитка путем циклического движения расплава вдоль фронта кристаллизации;
- возможность отливки биметаллических трубных заготовок;
- получение коаксиальных полых прессовых заготовок;
- мягкая схема напряженного состояния при прессовании, гарантирующая возможность прессования малопластичных сплавов; отсутствие надрывов внутренней поверхности трубной заготовки и исключение разностенности горячепрессованной трубы;
- использование тепла прессового передела при редуccionной горячей прокатке;
- возможность прессования и прокатки трубной заготовки с концевыми пробками, полностью исключаящими окисление и газонасыщение внутренней поверхности трубы на горячем переделе;
- создание натяжения редуccionным станом трубы, выходящей из прессовой матрицы, за счёт чего снижение силы прессования и исключение задиров поверхности трубы в калибрующей части матрицы;
- максимальное снижение степени холодной пластической деформации в цикле изготовления труб и снижение за счет текстурированности металла трубы; при интенсивной холодной

деформации на ХПТ или ХПТР последующие отжиги не в состоянии устранить текстуру деформации, так как она наследуется текстурой рекристаллизации; в итоге в готовых трубах прочность минимальна в тангенциальном направлении, что противоречит основному назначению большинства труб.

2.1. Температурная модель процесса передачи горячепрессованного профиля от пресса к прокатному стану

Математическая модель управления температурой профиля при передаче его от горизонтального гидравлического пресса к первой клетки прокатного стана управляет оборудованием предварительного охлаждения на данном промежутке. Структура оборудования предварительного охлаждения представлена на рисунке 2.2.

Распределение температур в объеме прессуемого слитка оказывает существенное влияние на весь технологический процесс прессования профилей на горизонтальных гидравлических прессах и во многих случаях оказывает существенное влияние на конечный градиент распределения температуры в прессуемом изделии. Исследование температурно-скоростных режимов прессования труб и сплошных профилей на гидравлических прессах было выполнено Готлибом Б.М [1]. В данной работе, все решения, связанные с распределением температур в процессе прессования, были позаимствованы у авторов [1].

Известно, что при прессовании, в зависимости от основных параметров прессования (вытяжка, скорость прессования, изначальное тепловое состояние прессуемого слитка и прессовой оснастки) происходит либо разогрев прессуемого профиля, либо его охлаждение. При настройке редуционно-растяжного стана очень важным параметром является распределения межклетевых натяжений, который в первую очередь зависит от сопротивления деформации. Сопротивление деформации в межклетевых промежутках определяются исходя из степени деформации, скорости деформации, температуры и протекания процессов рекристаллизации. Так как толщина стенки трубы формируется, исходя из поддерживаемых межклетевых натяжений, то главной задачей при управлении прокатным станом является поддержание стабильных межклетевых натяжений.

Авторы работы [1] разработали алгоритм и рекомендации на поддержание постоянных значений температуры прессуемого профиля на выходе из очка матрицы. Критерием управления является заданное изменение скорости прессования. С учетом вышесказанного, модель управления прокатным станом не может позволить изменение скорости прессования, так как процесс прокатки будет находиться все время в нестационарном режиме, что приведет к разнотолщинности трубы по длине.

Таким образом основной задачей модели управления температурой профиля при передаче его от горизонтального гидравлического прессы к первой клетке прокатного стана является получение постоянной температуры профиля на входе в прокатный стан при постоянной скорости прессования.

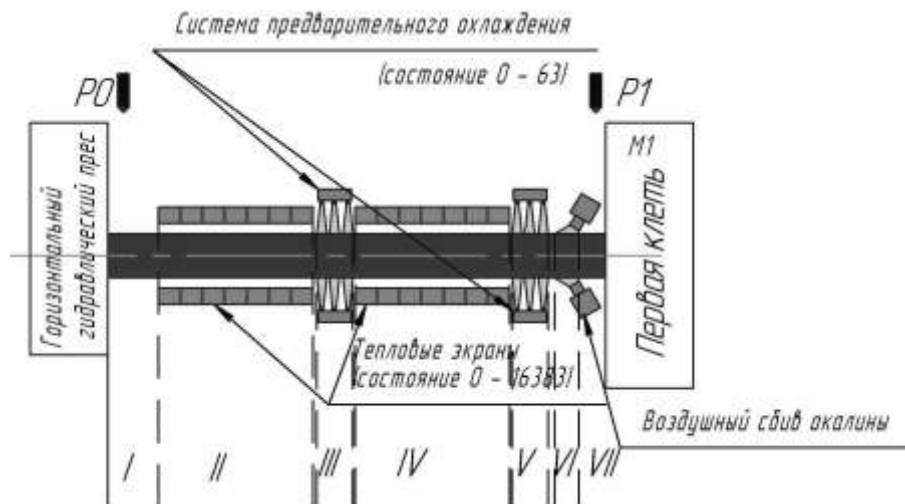


Рисунок 2.2 - Структура системы управления температурой профиля при передаче от прессы к прокатному стану

Структура системы предварительного охлаждения

В состав оборудования (в соответствии с рисунком 2.2) входят два пирометра: пирометр P0, который производит замер температуры на поверхности профиля на выходе из прессы, и пирометр P1, который производит замер температуры на поверхности профиля перед входом в прокатный стан. Модель управляет состоянием двух секций тепловых экранов. Каждая секция тепловых экранов состоит из отдельно управляемых семи экранов. Каждый экран имеет кольцевую форму и в каждый конечный момент времени состояние равно 1 (экран закрыт) и 0 (экран открыт). Под битовой маской состояния экранов предполагается десятичное представление двоичного числа, которое определяет состояние всех тепловых экранов. Таким образом, получаем два граничных состояния – когда все экраны открыты, то двоичный вектор и соответствующее ему битовая маска равна $000000000000_2 = 0_{10}$; когда все экраны закрыты, то двоичный вектор и соответствующее ему битовая маска равна $111111111111_2 = 16383_{10}$.

В состав оборудования также входят два кольцевых коллектора с тремя рядами сопел охлаждения. Битовая маска определяет состояние работы каждого отдельно взятого ряда сопел охлаждения. Два граничных состояния 0 – все сопла выключены и 63 – все сопла имеют заданный расход охлаждающей воды. Кроме состояний сопел охлаждения (включено или выключено) модель определяет необходимый расход охлаждающей воды на каждую группу сопел (коллектор).

Перед входом в прокатный стан расположен коллектор для воздушного сбива окалины и оттеснения воды системы предварительного охлаждения.

Алгоритм работы модели

Разработан алгоритм для расчета теплового поведения профиля с момента выхода металла из горизонтального гидравлического пресса и до момента входа в первую клеть редукионного стана. Построение алгоритма основывается на методе конечных разностей. Алгоритм определяет изменение температуры профиля (как функцию времени t) по диаметру профиля (координата r). Принято допущение, что поле распределения температур по диаметру профиля не зависит от тангенциальной координаты (в цилиндрической системе координат).

Основные характеристики модели, реализующей разработанный алгоритм расчета температуры:

- одномерная, конечно-разностная схема постановки задачи;
- выполняется решение уравнения теплопроводности (метод Кранка-Николсона);
- граничные условия (излучение, работа коллекторов охлаждения, работа системы воздушной очистки профиля);
- свойства материала являются функцией температуры (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность).

По диаметру профиль разделен на элементы. Размер сетки выбран с переменным шагом: более мелкий шаг ближе к внешней поверхности профиля и больший шаг ближе к центру профиля или к внутренней поверхности трубы. Элементы сетки показаны на рисунке 2.3.

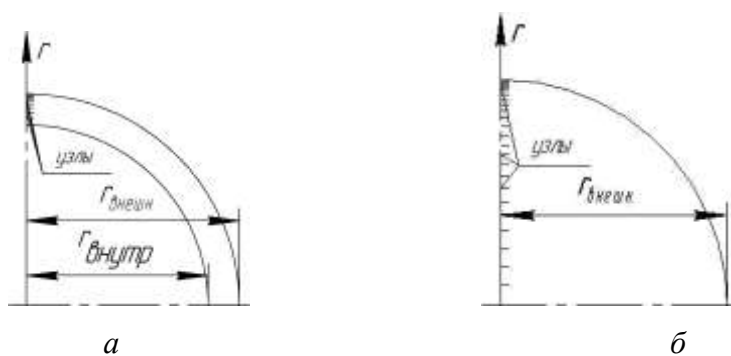


Рисунок 2.3 - Элементы сетки в одномерном конечно разностном решении уравнения теплопроводности: а – для трубы, б – для сплошного профиля

Уравнение теплопроводности определяет изменение температуры при помощи уравнения Фурье в узлах решетки (в цилиндрической системе координат):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda \mathcal{T}}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2.1.1)$$

где

T - температура в узлах, [°C]; t - время, [сек]; $\lambda = \lambda \mathcal{T}$ - функция коэффициента теплопроводности материала от температуры, [Вт/м⁰C]; $\rho = \rho \mathcal{T}$ - функция плотности материала трубы от температуры, [кг/м³]; $c_p = c_p \mathcal{T}$ - функция удельной теплоемкости материала трубы от температуры, [Дж/(кг °C сек)]; $r \in \mathcal{D}(r_{\text{внутр}}, r_{\text{внешн}})$ - координата узла, [м];

Конечно-разностный метод – метод для решения дифференциальных уравнений посредством дробления непрерывного пространства в элементы, вычисляющий значения неизвестных переменных в узлах конечной сетки (в соответствии с рисунком 2.3). Известно несколько методов для решения уравнения Фурье, которые дают хорошую аппроксимацию решения. Однако многие из них имеют неудобство использования в связи с малым шагом, для которого должны быть выполнены переходные вычисления, избегающие неустойчивостей численного решения и последовательной нехватки сходимости. Такой подход требует недопустимо большое время вычислений для расчета в реальном масштабе времени, который необходим для построения систем управления станом (АСУТП).

Поэтому был выбран и реализован неявный метод конечных разностей Кранка-Николсона для решения уравнения (2.1.1). Неявный метод Кранка-Николсона является устойчивым методом, который позволяет выполнить расчет изменения температуры с ограниченным числом тактов, позволяя уменьшать время вычислений, не влияя на точность прогноза изменения температуры.

Согласно методу Кранка-Николсона, температуры в узлах сетки (в случае переменного размера сетки) описываются следующим уравнением:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{\lambda \mathcal{T}}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \frac{1}{2 \cdot \Delta r_m} \cdot \left(\frac{T_{i-1}^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{T_{i+1}^{n+1}}{\Delta r_i} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_i} + \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right), \quad (2.1.2)$$

где $\Delta r_m = \frac{\Delta r_{i-1} + \Delta r_i}{2}$ - средний размер смежного элемента.

Индекс i отображает номер узла, индекс n отображает номер шага времени. Запишем уравнение (2.1.2) следующим образом: неизвестные температуры $(n+1)$ -ого шага времени перенесем в левую сторону, а компоненты с известной температурой n -ого шага времени – в правую:

$$-\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} \cdot T_{i-1}^{n+1} + \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \right) \cdot T_i^{n+1} - \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \cdot T_{i+1}^{n+1} = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right), \quad (2.1.3)$$

где $\chi_f = \frac{\lambda \mathcal{T}}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta r_m}$.

Таким образом, для вычисления температуры в узлах сетки необходимо решить систему линейных уравнений (2.1.3), где неизвестные – это температуры в узлах на $n+1$ -ом шаге времени. Неизвестные коэффициенты обозначим следующим образом:

$$\text{коэффициент слева от главной диагонали: } B = -\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}}; \quad (2.1.4)$$

$$\text{коэффициент на главной диагонали: } D = \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i}\right); \quad (2.1.5)$$

$$\text{коэффициент справа от главной диагонали: } A = -\frac{\chi_f}{\Delta r_i}; \quad (2.1.6)$$

$$\text{элементы постоянного вектора: } C = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) \quad (2.1.7)$$

Температура в узлах на $n+1$ -ом шаге времени может быть рассчитана путем решения тридиагональной системы уравнений:

$$\begin{vmatrix} D_{iL} & A_{iL} & 0 & 0 & 0 \\ B_i & D_i & A_i & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & B_{iU} & D_{iU} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_{iL}^{n+1} \\ T_i^{n+1} \\ \dots \\ \dots \\ T_{iU}^{n+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{iL} \\ C_i \\ \dots \\ \dots \\ C_{iU} \end{vmatrix}$$

Система уравнения представлена в матричной форме. Слева – произведение между коэффициентами матрицы уравнений и вектора неизвестных температур в узлах, справа – вектор постоянных уравнений. Другие элементы матрицы коэффициентов уравнения равны 0.

Вычислив коэффициенты B, D и A и константы C по уравнениям (2.1.4), (2.1.5), (2.1.6) и (2.1.7) система уравнений будет определена.

В матричном представлении системы уравнений первая линия L соответствует узлу, находящемуся на внешней поверхности трубы, где температуру необходимо рассчитать как функцию граничных условий, и последняя линия U соответствует узлу на внутренней поверхности трубы.

Расчет температуры узлов на внешней поверхности трубы

Температура узла на поверхности профиля рассчитана как функция граничных условий. Такая температура должна удовлетворить условию равновесия между тепловыми потоками, проходящими через поверхность. Из закона Фурье граничный тепловой поток:

$$q_w = -\lambda_t \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{\text{внешн}}}, \quad (2.1.8)$$

где q_w - тепловой поток на внешней поверхности трубы, [Дж/(м²сек)];

λ_t - теплопроводность материала трубы, [Дж/(м °С сек)].

При конечно-разностной аппроксимации предполагается, что распределение температуры около границы – полиномиальное. Для равноотстоящих точек сетки, увеличивающих ряд Тейлора, уравнение (2.1.8) может быть преобразовано:

$$q_w = -\lambda_t \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{внешн}}} = \frac{\lambda_t}{6 \cdot \Delta r} \cdot [1 \cdot T_1 - 18 \cdot T_2 + 9 \cdot T_3 - 2 \cdot T_4],$$

где T_1 - температура узла на поверхности; T_2, T_3 и T_4 - температуры второго, третьего и четвертого узлов.

Для вычисления температуры поверхности T_1 , необходимо рассчитать внешний тепловой поток с учетом определенных граничных условий. Значение количества тепла в единицу времени, проходящего через поверхность трубы, вычисляется, исходя из следующих механизмов теплообмена:

- излучение и воздушная конвекция;
- теплообмен с водой системы охлаждения.

Потери тепловым излучением и воздушной конвекцией

Полное тепловое излучение удовлетворяет условиям закона Стефана-Больцмана:

$$Q_p = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot [T_s^4 - T_{amb}^4], \quad [\text{Вт/м}^2]$$

где σ_s - коэффициент Стефана-Больцмана; ε_m - коэффициент излучения на поверхности профиля; T_s и T_{amb} - температура поверхности профиля и температура окружающей среды, [°K].

Коэффициент теплообмена зависит от псевдотемпературы и рассчитывается:

$$h_{rad} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{T_s^4 - T_{amb}^4}{T_s - T_{amb}} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot [T_s^2 + T_{amb}^2] \cdot [T_s + T_{amb}].$$

В расчетах рассматривается температурная зависимость теплоизлучения профиля.

Режим тепловой конвекции может быть естественной конвекцией, или вынужденной конвекцией, зависящей от скорости перемещения профиля.

Коэффициент теплообмена конвекцией h_{conv} - комплексная функция безразмерных чисел Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu), Прандтля (Pr):

$$h_{conv} = f(Re, Nu, Pr).$$

В случае горячей прокатки на низкой скорости, так как теплота, удаленная тепловой конвекцией является малой по сравнению с общей потерей тепла, коэффициент теплопередачи для естественной воздушной конвекции принят постоянным с закрепленным значением, приблизительно 8,5...10 Вт/(м²·°C).

Когда скорость прокатки увеличивается, коэффициент теплообмена для вынужденной конвекции становится больше, чем это значение, и его нельзя считать постоянным.

Коэффициент теплообмена конвекцией рассчитывается:

$$h_{conv} = \frac{2 \cdot \lambda_{air} \cdot Nu}{\pi \cdot r_{внешн}}.$$

Число Нуссельта есть функция числа Прандтля и Рейнольдса:

$$\text{для } Re < 5105: Nu = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.333},$$

$$\text{для } Re > 5105: Nu = 0.037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0.333},$$

где $Pr = \frac{\nu_{air} \cdot c_{air}}{\lambda_{air}}$ - число Прандтля; $Re = \frac{\rho_{air} \cdot V \cdot \pi \cdot r_{внешн}}{2 \cdot \nu_{air}}$ - число Рейнольдса.

В вышеописанных формулах использованы следующие обозначения:

$\lambda_{air} = \lambda_{air}(\bar{T})$ - теплопроводность воздуха как функция температуры, [Дж/(м·°С·сек)];

$\nu_{air} = \nu_{air}(\bar{T})$ - вязкость воздуха как функция температуры, [кг/(м·сек)];

$c_{air} = c_{air}(\bar{T})$ - удельная теплоемкость воздуха как функция температуры, [Дж/(кг·°С)].

В случае открытых тепловых экранов, среднюю температуру воздуха рассматриваем как среднеарифметическую температуру поверхности профиля и окружающего воздуха:

$$\bar{T}_{air0} = \frac{T_{air} + T_{Me}}{2}.$$

Результаты вклада излучения и конвекции в теплообмен будут рассчитаны:

$$Q_{total} = Q_r + Q_{conv} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot \bar{T}_s^4 - T_{amb}^4 + h_{conv} \cdot \bar{T}_s - T_{amb} = h_{rad} + h_{conv} \cdot \bar{T}_s - T_{amb}.$$

Принцип работы модели

Как было сказано, основной задачей модели является получение постоянной температуры профиля на входе в первую клеть прокатного стана (пирометр P1 в соответствии с рисунком 2.2) при постоянной скорости прессования и при изменяющейся температуре профиля на выходе из пресса (пирометр P0 в соответствии с рисунком 2.2). На рисунке 2.4 качественно представлен график изменения температуры прессуемого профиля во времени.

Модель рассчитывает температуру для некоторого участка профиля. В рамках каждого участка прессуемого профиля предполагается, что состояние битовых масок оборудования системы предварительного охлаждения является однородным. Длина участка профиля не является строго фиксированной величиной. Величина длины каждого участка является функцией теплового состояния профиля на выходе из горизонтального гидравлического пресса.

Пусть за некоторое время $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ температура прессуемого изделия изменяется на величину $\Delta T = T_i - T_{i-1}$. Предполагается, что в момент времени когда $T_i \in [T_i + \Delta T]$ рост или

падение температуры на выходе из очка матрицы (пирометр P0) находится в диапазоне допустимых температур на входе в первую клетку прокатного стана. В этот диапазон времени оборудование системы предварительного охлаждения находится в постоянном состоянии, при котором достигается температура на входе в первую клетку прокатного стана. В течение некоторого времени, заранее неизвестного, температура повышается (понижается) на некоторую величину ΔT . При выходе температуры на выходе из пресса за допустимые пределы модель температуры регистрирует событие, по которому она рассчитывает новую настройку оборудования системы предварительного охлаждения.

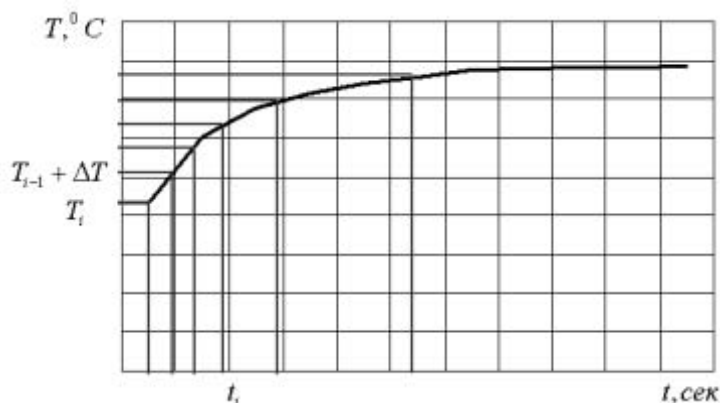


Рисунок 2.4 - Изменение температуры прессуемого профиля

На рисунке 2.5 показана упрощенная структурная схема работы алгоритма модели температуры профиля при передаче от гидравлического пресса к прокатному стану.

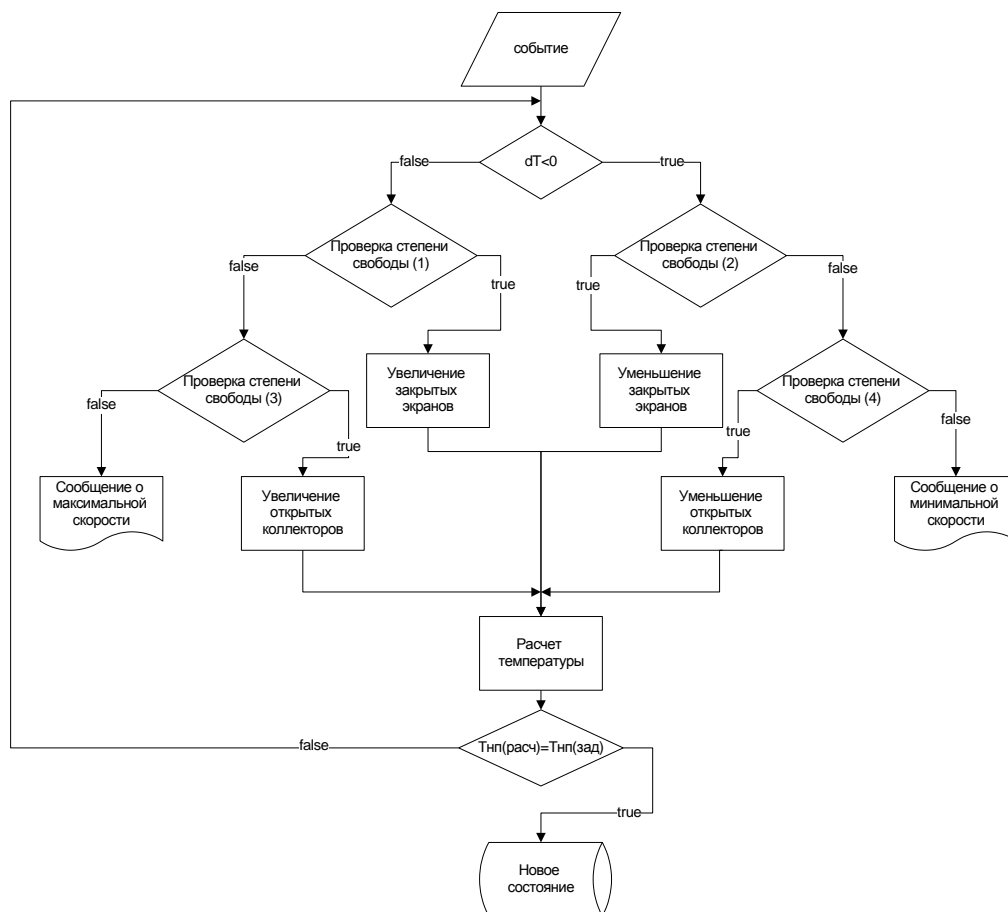


Рисунок 2.5 - Алгоритм работы модели

После наступления события выхода температуры за диапазон производится идентификация этого выпадения (происходит разогрев или охлаждение прессуемого профиля). Если происходит разогрев или охлаждение прессуемого профиля, то система должна соответственно уменьшить количество закрытых тепловых экранов или соответственно увеличить их количество. Перед процедурой изменения состояния тепловых экранов проверяется условие их состояния. В случае удовлетворения условию возможности изменить количество закрытых экранов производится расчет температуры начала прокатки и проверяется условие сходимости с заданной температурой начала прокатки. В случае невозможности изменить состояние тепловых экранов система производит изменение состояния коллекторов охлаждения. Процедура выполняется до сходимости (в рамках предельно допустимых температур) расчетного значения температуры и заданной температуры начала прокатки.

В случае невозможности получить заданную температуру начала прокатки (выпадение за пределы граничных состояний оборудования системы предварительного охлаждения) система генерирует событие максимально или минимально недопустимой скорости прессования. В этом случае модель управления гидравлическим прессом должна изменить скорость прессования.

2.2. Температурная модель непрерывного прокатного стана

Разработан алгоритм для расчета теплового поведения профиля с момента входа металла в первую клеть прокатного стана и до момента выхода из последней клетки стана. Построение алгоритма основывается на методе конечных разностей. Он определяет изменение температуры профиля (как функцию времени t) по диаметру профиля (координата r). Принято допущение, что поле распределения температур по диаметру профиля не зависит от тангенциальной координаты (в цилиндрической системе координат).

Основные характеристики модели, реализующей разработанный алгоритм расчета температуры:

- одномерная конечно-разностная схема постановки задачи;
- выполняется решение уравнения теплопроводности (метод Кранка-Николсона);
- граничные условия (излучение, контакт с валками, охлаждение в результате работы систем охлаждения валков, межклетевое охлаждение);
- свойства материала являются функцией температуры (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность);
- учет тепла деформации.

Уравнение теплопроводности описывает изменение температуры при помощи уравнения Фурье в узлах решетки:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q_{def}}{\rho \cdot c_p} \quad (2.2.1)$$

где T - температура в узлах, [°C]; t - время, [сек]; $\lambda = \lambda(T)$ - функция коэффициента теплопроводности материала от температуры, [Дж/(м·°C·сек)];

$\rho = \rho(T)$ - функция плотности материала трубы от температуры, [кг/м³]; $c_p = c_p(T)$ - функция удельной теплоемкости материала трубы от температуры, [Дж/(кг·°C·сек)]; $r \in [r_{нутр}, r_{внеш}]$ - координата узла, [м]; Q_{def} - тепло деформации, [Дж/(м³ сек)].

Реализован неявный метод конечных разностей Кранка-Николсона для решения уравнения (2.2.1). Неявный метод Кранка-Николсона является устойчивым методом, который позволяет выполнить расчет изменения температуры с ограниченным числом тактов, позволяя сохранять время вычислений, не влияя на точность прогноза изменения температуры.

Согласно методу Кранка-Николсона, температуры в узлах сетки (в случае переменного размера сетки) описываются следующим уравнением:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{\lambda \overline{\kappa}}{c_p(T) \cdot \rho(T) \cdot 2 \cdot \Delta r_m} \cdot \left(\frac{T_{i-1}^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} + \frac{T_{i+1}^{n+1}}{\Delta r_i} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_{i-1}} - \frac{T_i^{n+1}}{\Delta r_i} + \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) + \frac{Q_{def}}{\rho \cdot c_p}, \quad (2.2.2)$$

где $\Delta r_m = \frac{\Delta r_{i-1} + \Delta r_i}{2}$ - средний размер смежного элемента.

Индекс i отображает номер узла, индекс n отображает номер шага времени.

Запишем уравнение (2.2.2) следующим образом: неизвестные температуры $(n+1)$ -ого шага времени в левой стороне и компоненты с известной температурой n -ого шага времени в правой стороне:

$$-\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} \cdot T_{i-1}^{n+1} + \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \right) \cdot T_i^{n+1} - \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \cdot T_{i+1}^{n+1} = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) + \frac{Q_{def}}{\rho \cdot c_p}, \quad (2.2.3)$$

где $\chi_f = \frac{\lambda \overline{\kappa}}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \cdot \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta r_m}$.

Таким образом, для вычисления температуры в узлах сетки, необходимо решить систему линейных уравнений (2.2.3), где неизвестные – это температуры в узлах на $n+1$ -ом шаге времени. Неизвестные коэффициенты обозначим следующим образом:

$$\text{коэффициент слева от главной диагонали } B = -\frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}}; \quad (2.2.4)$$

$$\text{коэффициент на главной диагонали } D = \left(1 + \frac{\chi_f}{\Delta r_{i-1}} + \frac{\chi_f}{\Delta r_i} \right); \quad (2.2.5)$$

$$\text{коэффициент справа от главной диагонали } A = -\frac{\chi_f}{\Delta r_i}; \quad (2.2.6)$$

элементы постоянного вектора

$$C = T_i^n + \chi_f \cdot \left(\frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta r_i} - \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta r_{i-1}} \right) + \frac{Q_{def}}{\rho \cdot c_p}. \quad (2.2.7)$$

Температура в узлах на $n+1$ -ом шаге времени может быть рассчитана путем решения тридиагональной системы уравнений, представленной в матричной форме как в предыдущей задаче:

$$\begin{vmatrix} D_{iL} & A_{iL} & 0 & 0 & 0 \\ B_i & D_i & A_i & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & B_{iU} & D_{iU} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} T_{iL}^{n+1} \\ T_i^{n+1} \\ \dots \\ \dots \\ T_{iU}^{n+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{iL} \\ C_i \\ \dots \\ \dots \\ C_{iU} \end{vmatrix}$$

Система уравнения представлена в матричной форме. Слева – произведение между коэффициентами матрицы уравнений и вектора неизвестных температур в узлах, справа – вектор постоянных уравнений. Другие элементы матрицы коэффициентов уравнения равны 0.

Вычислив коэффициенты В, D и А и константы С по уравнениям (2.2.4), (2.2.5), (2.2.6) и (2.2.7) система уравнений будет определена.

В матричном представлении системы уравнений первая линия L соответствует узлу, находящемуся на внешней поверхности трубы, где температуру необходимо рассчитать как функцию граничных условий, и последняя линия U соответствует узлу на внутренней поверхности трубы.

Расчет температуры узлов на внешней поверхности профиля осуществляется также, как и при движении профиля от прессы к прокатному стану с учетом следующих механизмов теплообмена:

- излучение и воздушная конвекция;
- теплообмен с водой системы охлаждения рабочих валков, или охлаждения профиля в межклетевом промежутке;
- контакт между трубой и рабочим валком в калибре.

Тепловые явления в калибре

При прохождении профиля через калибр, в результате пластической деформации, происходит внутреннее тепловыделение. В то же время в контакте между трубой и валками совершается работа трения из-за их относительного движения и возникают тепловые потоки переноса между этими двумя элементами. Поэтому изменение температуры профиля в течение времени прохождения через калибр – результат вклада следующих трех главных компонентов:

- тепло деформации;
- энергия трения в зоне контакта;
- теплопередача от профиля к валкам, из-за разности температур.

Энергия деформации – функция локальной эквивалентной деформации и сопротивления металла пластической деформации.

Используем упрощенную зависимость для вычисления выделяемой теплоты Q_{def} в объеме очага деформации V_{oc} :

$$Q_{def} = \eta_{def} \cdot \sigma_s \cdot \epsilon \cdot T \cdot V_{oc} \cdot \ln \lambda,$$

где λ - вытяжка в клети; η_{def} - эффективное тепло за счет пластической деформации.

Теплота трения, сгенерированная на поверхности контакта из-за работы сил трения системы профиль-валок во время относительного перемещения рассчитывается по формуле:

$$Q_{mp} = \frac{\mu \cdot P_{cp}}{4} \cdot \left(1 + \lambda \cdot v_{вал} \cdot s_{on} \right),$$

где P_{cp} - среднее давление металла на валки в калибре, [МПа];

$v_{вал}$ - окружная скорость вала (на катающем диаметре), [м/с];

μ - коэффициент трения по Кулону-Амонтону;

s_{on} - опережение.

Тепловой поток на границе между трубой и валком – функция локальной разницы температуры между двумя поверхностями контакта. Граничное уравнение равновесия:

$$-\lambda_s(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = h_c (T - T_c) = Q_c,$$

где $\lambda_s(T)$ - теплопроводность металла как функция температуры;

h_c - коэффициент теплообмена для контакта профиль-валок;

T_c - температура поверхности вала в контакте с профилем;

T - температура поверхности профиля в контакте с валком.

Так как теплопроводность на поверхности контакта профиля и вала во время горячей прокатки зависит от контактного давления и является достаточно малой, чтобы считаться значительной, то можно использовать упрощенную формулу для вычисления. Так как тепловые потоки в тонком слое около контактной поверхности могут быть суммированы каждый как тепловой поток в полубесконечное твердое тело, тогда общий тепловой поток Q_c может быть рассчитан

$$Q_c = F_k \cdot \chi_f \cdot \frac{2\lambda_s(T)}{\sqrt{\pi \cdot a_s}} \frac{T_{s0} - T_m}{\sqrt{t_c}},$$

где средняя температура поверхности вала T_m вдоль поверхности контакта получена как

$$T_m = \frac{\lambda_s a_s^{-1/2} \cdot T_{s0} + \lambda_c a_c^{-1/2} \cdot T_{c0}}{\lambda_s a_s^{-1/2} + \lambda_c a_c^{-1/2}};$$

λ_s, λ_c - теплопроводность поверхности профиля и вала;

a_s, a_c - тепловая диффузия поверхностного слоя профиля и вала;

T_{s0}, T_{c0} - температура поверхности профиля и вала перед входом участка профиля в калибр; F_k - площадь контакта; χ_f - коэффициент сглаживания (параметр настройки модели температуры АСУ ТП); t_c - время контакта.

Потери тепловым излучением и воздушной конвекцией

В проходе профиля между клетями излучение в атмосферу – преобладающий механизм тепловых потерь.

Полное тепловое излучение удовлетворяет условиям закона Стефана-Больцмана:

$$Q_p = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4), \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

где σ_s - коэффициент Стефана-Больцмана;

ε_m - коэффициент излучения на поверхности профиля;

T_s и T_{amb} - температура поверхности профиля и температура окружающей среды, [°K].

Коэффициент теплообмена зависит от псевдотемпературы и рассчитывается по формуле:

$$h_{rad} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{T_s^4 - T_{amb}^4}{T_s - T_{amb}} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot (T_s^2 + T_{amb}^2) \cdot (T_s + T_{amb}).$$

В расчетах рассматривается температурная зависимость теплоизлучения трубы.

Режим тепловой конвекции может быть естественной конвекцией, или вынужденной конвекцией, зависящей от скорости перемещения профиля.

Коэффициент теплообмена конвекцией h_{conv} - комплексная функция безразмерных чисел Рейнольдса (Re), Нуссельта (Nu), Прандтля (Pr):

$$h_{conv} = f(Re, Nu, Pr).$$

В случае горячей прокатки на низкой скорости, так как теплота, удаленная тепловой конвекцией является малой по сравнению с общей потерей тепла, коэффициент теплопередачи для естественной воздушной конвекции принят постоянным, с закрепленным значением приблизительно 8,5...10 Вт/(м²·°C).

Когда скорость прокатки увеличивается, коэффициент теплообмена для вынужденной конвекции становится больше чем это значение и нельзя считать его постоянной величиной.

Коэффициент теплообмена конвекцией рассчитывается:

$$h_{conv} = \frac{2 \cdot \lambda_{air} \cdot Nu}{\pi \cdot r_{внешн}}.$$

Число Нуссельта есть функция числа Прандтля и Рейнольдса:

$$\text{для } Re < 5105: Nu = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.333};$$

$$\text{для } Re > 5105: Nu = 0.037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0.333},$$

где $Pr = \frac{\nu_{air} \cdot c_{air}}{\lambda_{air}}$ - число Прандтля; $Re = \frac{\rho_{air} \cdot V \cdot \pi \cdot r_{внешн}}{2 \cdot \nu_{air}}$ - число Рейнольдса.

В вышеописанных формулах использованы следующие обозначения:

$\lambda_{air} = \lambda_{air}(T)$ - теплопроводность воздуха как функция температуры, [Дж/(м·°C·сек)];

$\nu_{air} = \nu_{air}(T)$ - вязкость воздуха как функция температуры, [кг/(м·сек)];

$c_{air} = c_{air}(T)$ - удельная теплоемкость воздуха как функция температуры, [Дж/(кг·°C)].

Среднюю температуру воздуха рассматриваем как среднеарифметическую температуру поверхности трубы и окружающего воздуха:

$$\bar{T}_{air} = \frac{T_{air} + T_{tube}}{2}.$$

Результаты вклада излучения и конвекции в теплообмен будут рассчитаны:

$$Q_{total} = Q_r + Q_{conv} = \sigma_s \cdot \varepsilon_m \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) + h_{conv} \cdot (T_s - T_{amb}) = h_{rad} + h_{conv} \cdot (T_s - T_{amb}).$$

Тепловые явления в межклетевых промежутках

Во время прохождения профиля через каждый межклетевой промежуток по линии редуционно-растяжного стана несколько механизмов теплообмена влияют на изменение температуры, в зависимости от граничных условий (в соответствии с рисунком 2.6):

- излучение + конвекция (зона II и IV);
- теплообмен из-за контакта валков с охлаждающей водой на выходе и входе в калибр (зона I и V);
- конвективный теплообмен под охлаждающей струей в межклетевом промежутке (зона III).

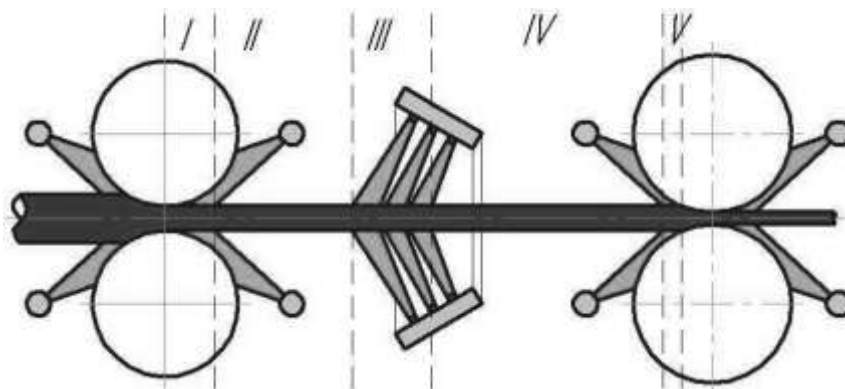


Рисунок 2.6 - Дробление межклетевой зоны на подзоны

На линии редуционно-растяжного стана предполагается система межклетевого охлаждения, которая состоит из кольцевых коллекторов охлаждения, установленных во всех межклетевых промежутках. На каждом кольцевом коллекторе расположено три независимых ряда сопел.

В тепловой модели полосы межклетевые зоны подразделены на подзоны в зависимости от соответствующих граничных условий. Уравнение теплопроводности (2.2.1) решается на основании граничных условий, необходимых для определения температуры поверхности трубы (температуры внешнего узла).

Математическая модель управления температурно-скоростным режимом прессования, напрямую совмещенного с редуционно-растяжной прокаткой, дает возможность построения системы автоматического управления напряжением натяжения прессуемой трубы на выходе пресса и межклетевыми натяжениями при редуцировании трубы, гарантирующими обеспечение требуемой толщины стенки трубы. Впервые предложен алгоритм управления температурным режимом прокатки, при котором возможна закалка труб из аустенитных сталей непосредственно на выходе из прокатного стана.

2.3. Температурная модель линии охлаждения катаных профилей

Коррозионно-стойкие марки стали 12X18H9, 12X18H9T и 12X18H10T относятся к хромоникелевым маркам аустенитного класса. В хромоникелевых аустенитных сталях возможны следующие превращения [2]: образование карбидных, карбонитридных фаз и σ -фазы при нагревах в интервале $650-850^{\circ}\text{C}$; растворение этих фаз при нагреве до более высоких температур ($1100-1200^{\circ}\text{C}$); образование δ -феррита при высоких температурах нагрева; образование α - и ε -мартенситных фаз при охлаждении и пластической деформации.

Выделение карбонитридных фаз происходит преимущественно по границам зерен, что снижает пластичность сталей и их сопротивление МКК. Таким образом, целью термической обработки является получение аустенитной структуры, снятие внутренних напряжений и устранение склонности к МКК, которая возникает при горячей обработке давлением [2].

Термическая обработка нестабилизированных титаном или ниобием хромоникелевых аустенитных сталей (например, 12X18H9) заключается в закалке из однофазной аустенитной области (1000°C) в воду. Стали стабилизированные титаном или ниобием, закаляются из двухфазной области аустенита и специальных карбидов, температура составляет обычно $1000...1100^{\circ}\text{C}$ [2].

Недостатком закалки стали являются большие энергозатраты на осуществление нагрева до указанных температур. Целесообразно использовать тепло нагрева под деформацию. Для получения равномерной температуры по длине профиля необходимо создание моделей управления, способных регулировать скорость охлаждения по длине профиля.

За станом прокатки сплошных и полых профилей устанавливается линия охлаждения. Линия охлаждения может состоять из нескольких блоков охлаждения. В зависимости от требуемой скорости охлаждения профиля, для получения заданной структуры, каждый блок может изменять расход воды для охлаждения профиля. В зависимости от конструкции блока охлаждения расход воды может варьироваться от 0 (блок выключен) до $30\text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении воды в форсунках до 2МПа.

Задачей температурной модели охлаждения профилей является подбор совокупности включенных блоков охлаждения и назначение уставки в этих блоках расхода охлаждающей воды, с целью обеспечения заданной скорости охлаждения.

Скорость охлаждения и длительность структурного преобразования рационально определять на основании термокинетических диаграмм. На рисунке 2.7 показана схема термокинетической диаграммы с условными кривыми охлаждения для разных слоев поперечного сечения охлаждаемого профиля из стали 12X18H9 (а) и 12X18H9Т (б) [2].

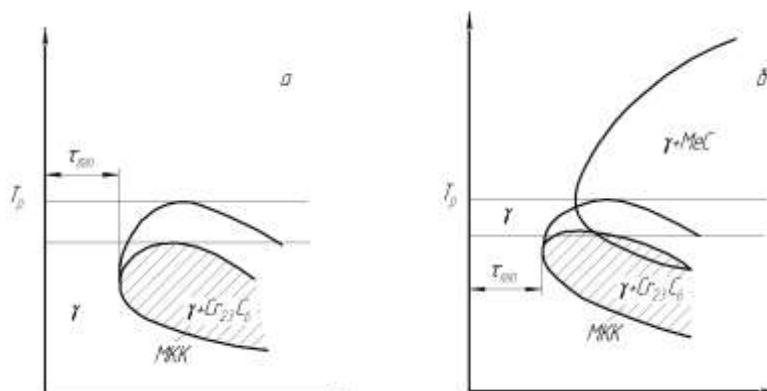


Рисунок 2.7 - Схема термокинетической диаграммы

Основные характеристики модели, реализующей разработанный алгоритм расчета температуры:

- одномерная конечно-разностная схема постановки задачи;
- выполняется решение уравнения теплопроводности (метод Кранка-Николсона);
- граничные условия (излучение, конвективный теплообмен);
- свойства материала являются функцией температуры (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность).

Метод решение уравнения теплопроводности довольно подробно описан в пункте 2.1 и 2.2. При охлаждении в бочке, где существует относительное разнонаправленное перемещение профиля и охлаждающей воды, возникают некоторые трудности при определении коэффициента теплопроводности, который фактически является фиктивной величиной. В работах [3, 4] показано, что нестационарные задачи теплопереноса следует в общем случае решать как сопряженные, т.е. одновременно необходимо решать уравнения переноса и для тела и для среды, омывающей тело. Однако в ряде случаев применение граничных условий третьего рода вполне оправдано [5].

В работе [5] выполнен расчет зависимости коэффициента теплопередачи от температуры. Данная зависимость представлена на рисунке 2.8.

Задача модели настройки охлаждения заключается в расчете группы данных, которые будут использованы на уровне 1 как уставки для выполнения следующих операций:

- активация исходного шаблона блоков охлаждения и их расходов;
- осуществление прямой коррекции, основанной на замерах колебаний температуры конца прокатки (температуры профиля на выходе из последней клетки стана);
- осуществление предсказуемой коррекции, основанной на замерах или расчетах колебаний скорости профиля;

осуществление коррекции по сигналам обратной связи, основанной на погрешностях температуры конца охлаждения.

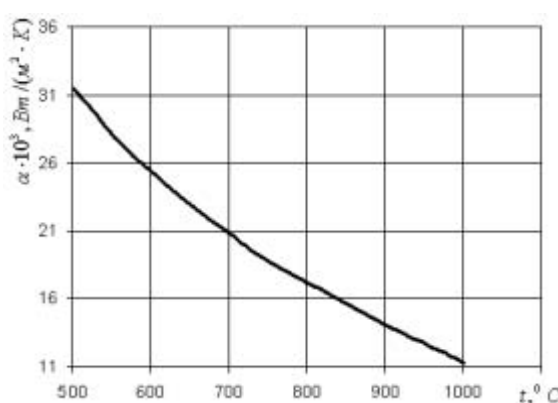


Рисунок 2.8 - Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры

Модель настройки охлаждения рассчитывает шаблоны блоков охлаждения, учитывая заданный температурный профиль (определяется на основании термокинетических диаграмм), т.е. заранее определенную траекторию время-температура. Начиная с этой траектории, настройка охлаждения выберет шаблон блоков охлаждения, необходимых для достижения заданных изменений температуры профиля.

Конфигурация шаблона блоков охлаждения рассчитывается и направляется на уровень 1 для различных зон профиля; каждую зону можно рассматривать как участок профиля с одинаковыми характеристиками в отношении шаблона охлаждения, который применяется для обеспечения заданной температуры конца охлаждения профиля.

Модель настройки охлаждения рассчитает зоны охлаждения и соответствующие шаблоны, следуя приведенному ниже алгоритму:

1. используя исходную (пусковую) скорость профиля, модель рассчитывает первый шаблон зоны; в таком шаблоне активным будет первый блок в положении, соответствующем охлаждению водой при температуре, взятой согласно температурному профилю (температура начала охлаждения);

- исходя из скорости движения профиля, модель рассчитывает отклонение текущей температуры (на первом блоке шаблона) от стартовой температуры охлаждения; когда отклонение от вышеназванной температуры достигает предварительно определенного предела (данный предел выбирается на основании аппаратных возможностей системы управления станом с точки зрения производительности вычислительных машин) определяется следующая зона и происходит расчет нового шаблона для этой зоны; новый шаблон блока охлаждения также будет иметь новые приоритеты переключения, происходит возврат к шагу (2) до тех пор, пока профиль не будет весь покрыт зонами.

Расчет целевой кривой охлаждения

Модель вычисляет целевую кривую охлаждения. Кривая охлаждения – это зависимость вида: температура – время, которому должна следовать каждая зона профиля. Целевая кривая охлаждения определена, начиная со стандартного «температурного профиля», который является множеством пар времени/температуры

$$\begin{pmatrix} T_0 & T_1 & \dots T_N \\ t_0 & t_1 & \dots t_N \end{pmatrix}.$$

Чтобы получить целевую кривую охлаждения от температурного профиля, модель понижает первую температурную точку T_0 до целевой температуры конца прокатки профиля ($T_{кп}$). Схема основной целевой кривой охлаждения представлена на рисунке 2.9.

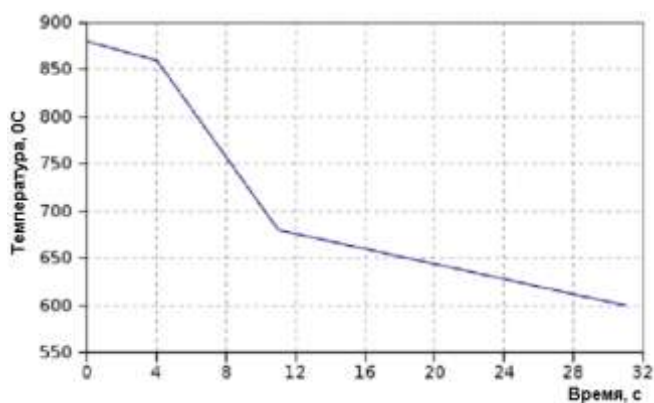


Рисунок 2.9 - Схема кривой охлаждения

Выбор блока охлаждения

Были определены одна или более зон охлаждения. Для каждой зоны охлаждения, идентифицированной посредством начальной и конечной длины прокатанного профиля, установлена скорость и соответственно модель назначит для каждой зоны охлаждения полосы – для каждого блока охлаждения заданное падение температуры ΔT^{target} , которое представляет

разность между фактической расчетной температурой и целевой температурой кривой охлаждения в фиксированное время и положение точки профиля по длине линии охлаждения. Тогда, начиная с конечной температуры конца охлаждения, алгоритм вычисляет для каждого положения точки профиля вдоль линии охлаждения целевой эквивалентный коэффициент теплообмена:

$$H_{eq}^{target} = \frac{\Delta T^{target} \cdot c(T) \cdot \rho(T) \cdot \Delta r}{\Delta t \cdot (T_n - T_{вод})},$$

где $c(T)$ - удельная теплоемкость стали как функция температуры; $\rho(T)$ - плотность стали как функция температуры; Δr - толщина стенки трубы (или радиус сплошного профиля); $T_n, T_{вод}$ - температура профиля и температура воды соответственно.

На основании полученного вектора значений эквивалентного теплообмена возможно получить требуемый расход в каждом блоке, который необходимо включить для поддержания целевого профиля охлаждения.

Таким образом, идентифицирована первая уставка блоков охлаждения для каждой зоны. Количество зон и соответственно количество уставок системы охлаждения во многом зависит от стабильности протекания процесса прокатки. В случае стабильного предсказания температуры и достоверно контролируемого расхода жидкости в блоках охлаждения при неизменной скорости прессования и соответственно скорости выхода профиля из последней клетки прокатного стана модель идентифицирует только одну зону и уставки для нее.

Созданная численная модель редукционно-растяжной прокатки труб в круглых калибрах четырех конических валков базируется на использовании метода конечных элементов. Модель позволяет определить поля напряжений и деформации в объеме деформируемого профиля. На базе КЭ-модели выполнен планированный эксперимент и регрессионный анализ результатов. Идентифицированы регрессионные модели поведения стенки трубы во всех клетях стана. Принципиально новым элементом алгоритма управления скоростным режимом работа непрерывного стана при случайно изменяющейся скорости входа трубы является формирование уставки не по абсолютным значениям скорости прокатки в каждой клетке, а по величине отношений частных расходов рабочей жидкости гидроприводами клеток к общему расходу по стану.

2.4. Деформационно-скоростная модель непрерывного стана

Деформационно-скоростная модель непрерывного прокатного стана функционально состоит из трех основных частей:

- модель распределения обжатий профиля по клетям стана;
- модель расчета уставок для первоначальной настройки стана;

- расчет чувствительностей для обновления настройки.

Модель распределения обжатий профиля

Модель распределения обжатий не относится к общей системе управления процессом прокатки на редуционно-растяжном стане. Основной задачей данной модели является идентификация стратегии калибровки валков стана. Данная модель относится к классу оптимизационных моделей и в зависимости от целевой функции при оптимизации может использовать функции модели расчета уставок для настройки и управления процессом. При создании новых станов и систем управлений появляется возможность гибкой перенастройки стана на различные типоразмеры прокатываемых профилей. Так практика применения станов редуционной прокатки показывает, что легко осуществима возможность изменения положения валков в клетки соответственно с изменением размеров калибра, возможность вывода последних клеток непрерывного стана для получения меньшего суммарного обжатия по диаметру. В связи с этим на задачу оптимизации накладывается ряд ограничений, при которых нецелесообразно строить функцию оптимизации и решать ее. Таким образом, при выборе стратегии обжатий в данной работе модель оптимизации строиться не будет.

Модель распределения обжатий профиля по клетям стана имеет несколько функций:

- равномерное распределение обжатий по клетям;
- распределение обжатий согласно заданному относительному вектору обжатий в каждой клетки стана, при котором обжатие задается относительным коэффициентом по отношению к первой клетки стана;
- равномерное распределение вытяжек по клетям стана;
- распределение вытяжек согласно заданному относительному вектору вытяжек в каждой клетки стана;
- распределения по энергосиловым характеристикам.

Только первые две функции модели распределения обжатий не требуют участия модели расчета уставок. Остальные функции имеют контур связи с моделью расчета уставок, так как сигнатура их функции оптимизации включает в себя параметры, которые идентифицирует модель расчета уставок. Функция распределения по энергосиловым характеристикам предполагает оптимизацию распределения обжатий исходя из минимально возможной величины расходуемой энергии при прокатке конкретного типоразмера профиля.

Дано: начальный диаметр прессованной трубы d_0 и конечный диаметр прокатанной трубы d_k , конечное обжатие трубы по диаметру на стане подразделяется между клетями согласно выбранным типам нагрузок и их величинам.

Распределение нагрузок определяется следующими двумя типами нагрузок:

- абсолютная нагрузка: относительное обжатие клетки является входной величиной нагрузки;
- относительная нагрузка: для клеток с относительным типом нагрузки, обжатия профиля по диаметру рассчитываются в соответствии с входящими величинами нагрузки по обжатию, умноженные на единственный рассчитанный коэффициент пропорциональности, поддерживающий выбранную относительную нагрузку между клетями.

Относительное обжатие по диаметру в клетке:

$$\varepsilon_{\varnothing}(i) = \frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}}.$$

Обжатия клетки должны удовлетворять следующему уравнению:

$$d_k = d_0 \cdot \prod_{i=0}^n (1 - \varepsilon_{\varnothing}(i)), \quad (2.4.1)$$

где n - число клеток стана.

Учитывая одновременное задание абсолютной и относительной нагрузки по обжатию клетки, коэффициент относительного обжатия был рассчитан таким образом, чтобы удовлетворить нижеследующему уравнению:

$$d_k = d_0 \left(\prod_{iAbs} (1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i)) \right) \left(\prod_{iRel} (1 - k_1 \varepsilon_{\varnothing rel}(i)) \right),$$

где $\varepsilon_{\varnothing abs}$ - заданное относительное обжатие по диаметру в клетке в соответствии с абсолютным типом нагрузки; $\varepsilon_{\varnothing rel}$ - заданное относительное обжатие по диаметру в клетке в соответствии с вектором относительных коэффициентов обжатий.

Обозначим

$$\chi = \frac{d_0}{d_k} \prod_{iAbs} (1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i));$$

тогда

$$\frac{1}{\chi} = \prod_{iRel} (1 - k_1 \varepsilon_{\varnothing rel}(i));$$

и в логарифмической форме

$$-\ln \chi = \sum_{iRel} \ln(1 - k_1 \varepsilon_{\varnothing rel}(i)). \quad (2.4.2)$$

Уравнение (2.4.1) может быть преобразовано разложением в ряд Тейлора:

$$\ln(1 - \chi) = -A\chi - B\chi^2, \text{ при } -1 \leq \chi \leq 1.$$

Тогда уравнение (2.4.2) может быть записано как:

$$-\ln \chi = -A \cdot k_1 \sum_{iRel} \varepsilon_{\varnothing rel}(i) - B \cdot k_1^2 \sum_{iRel} \varepsilon_{\varnothing rel}^2(i) \quad (2.4.3)$$

Уравнение (2.4.3) является линейным уравнение второго порядка с одним неизвестным k_1 . Решение этого уравнения выполняется в первом приближении для коэффициента относительного обжатия в клетки. Обжатия по диаметру, где был выбран относительный тип нагрузки:

$$\varepsilon_{\varnothing}(i) = k_1 \cdot \varepsilon_{\varnothing rel}(i).$$

Во втором приближении выполняется ввод коэффициента относительного обжатия второго порядка k_2 , для компенсации ошибок, заложенных на первом шаге, тогда получается

$$d_k = d_0 \left(\prod_{iAbs} 1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i) \right) \left(\prod_{iRel} 1 - k_1(1 - k_2) \varepsilon_{\varnothing rel}(i) \right). \quad (2.4.4)$$

Расчет конечного диаметра согласно первому приближенному шагу

$$d_k = d_0 \left(\prod_{iAbs} 1 - \varepsilon_{\varnothing abs}(i) \right) \left(\prod_{iRel} 1 - k_1 \cdot \varepsilon_{\varnothing rel}(i) \right),$$

тогда уравнение (2.4.4) может быть записано как

$$d_k = d_k^* \cdot \prod_{iRel} \left[1 + k_2 \frac{1 - \varepsilon_{\varnothing}(i)}{\varepsilon_{\varnothing}(i)} \right].$$

Преобразованный в логарифмическую форму коэффициент второго порядка относительного обжатия k_2 :

$$k_2 = \frac{\ln \left(\frac{d_k}{d_k^*} \right)}{\sum_{iRel} \left(\frac{1 - \varepsilon_{\varnothing}(i)}{\varepsilon_{\varnothing}(i)} \right)}.$$

Окончательный коэффициент относительного обжатия клетки:

$$k = k_1 \cdot 1 - k_2,$$

и величина обжатия в клетки, где был выбран относительный коэффициент обжатия, рассчитывается как:

$$\varepsilon_{\varnothing}(i) = k \cdot \varepsilon_{\varnothing rel}(i),$$

а в клетки, где была выбрана абсолютная нагрузка по обжатию:

$$\varepsilon_{\varnothing}(i) = \varepsilon_{\varnothing abs}(i).$$

Соответственно диаметр калибра в клетки будет определяться как:

$$d_i = d_{i-1} \cdot 1 - \varepsilon_{\varnothing}(i).$$

Таким образом, разработан алгоритм расчета диаметра калибра в каждой клетки вдоль прокатного стана. Алгоритм позволяет создать калибровку с возможностью как равномерного, так

и относительного распределения обжатий между клетями стана. Преимуществом алгоритма является возможность фиксировать обжатия в любой клетке. Данная возможность востребована при проектировании калибровки таким образом, что при выводе из работы последних клеток стана существует возможность прокатки нескольких типоразмеров труб (по внешнему диаметру).

Модель распределения вытяжек

При идентификации скоростного режима прокатки профиля необходимо некоторым образом спроектировать распределение вытяжек по клетям стана. В данном случае существует бесконечно большой выбор в допустимом пространстве распределения вытяжек.

При постановке задачи предполагаем, что известно количество клеток редуционного стана n . Каждая i -ая клетка рассматривается как i -ая стадия обработки трубы с известными начальными размерами трубы d_0 и s_0 и известными конечными размерами d_k и s_k . Также считается известным распределение обжатий по диаметру, т.е. известен вектор d_i . Суммарная вытяжка в таком случае равна:

$$\lambda_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n \lambda_i, \quad (2.4.5)$$

где λ_i - вытяжка в i -ой клетке:

$$\lambda_i = \frac{(d_{i-1} - s_{i-1})s_{i-1}}{(d_i - s_i)s_i}. \quad (2.4.6)$$

Распределение вытяжек по клетям редуционного стана должно удовлетворять следующему условию:

$$s_k = \frac{d_k}{2} - \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{(d_0 - s_0)s_0}{\lambda_{\Sigma}}}. \quad (2.4.7)$$

В результате распределения вытяжек устанавливается режим межклетевых натяжений. В литературе приводится множество методик распределения вытяжек, но они все сводятся к двум случаям: равномерное распределение вытяжки по всем клетям и распределение вытяжки с условием равномерной загрузки электродвигателей клеток. Рационально выполнить распределение вытяжек (и тем самым распределение натяжений) с проверкой условия пробуксовывания или проволкивания трубы в калибре [6, 7]:

$$\left(\frac{\sin \alpha_i}{\mu} \right)^2 \left[0.44 + \left(\frac{\frac{1-K}{K} T_i - T_{i-1}}{a \cdot p_i F_i} \right) \right] \leq 1, \quad (2.4.8)$$

где T_{i-1} , T_i - усилия переднего и заднего натяжений соответственно;

$$T_{i-1} = \pi \cdot d_{i-1} - s_{i-1} \cdot \sigma_s \cdot z_{i-1} \text{ и } T_{i-1} = \pi \cdot d_i - s_i \cdot \sigma_s \cdot z_i; \quad (2.4.9)$$

α_i - угол контакта

$$\alpha_i = 0.6 \arcsin \frac{2l_i}{D_k} \pm \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a \cdot \bar{p}_i F_i}{\frac{1-K}{K} T_i - T_{i-1}} \right)^2}}, \quad (2.4.10)$$

(“+” если $T_{i-1} \geq T_i$ и “-” если $T_{i-1} \leq T_i$);

F_i - площадь контакта

$$F_i = 2d_i \sin\left(\frac{\pi}{a}\right) \cdot l_i; \quad (2.4.11)$$

l_i - длина зоны контакта профиля и валков

$$l_i = \sqrt{d_{i-1} - d_i} \cdot \bar{D}, \quad (2.4.12)$$

$\bar{D} = 0.5(D_{\max} + D_{\min})$ - средний диаметр конического валка;

\bar{p} - среднее удельное давление

$$\bar{p} = \eta_i \cdot \sigma_{si} \cdot \frac{2s_i}{D_i} \cdot \bar{z}_i; \quad (2.4.13)$$

$$\bar{z}_i = K z_{i-1} + (K-1) z_i; \quad (2.4.14)$$

$$K = \frac{\bar{D}}{d_i} + 0.15; \quad (2.4.15)$$

μ - коэффициент трения по Кулону-Амонтону (при расчетах принимается равным 0,44).

Первоначально вытяжка распределяется равномерно по всем клетям

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\lambda_{\Sigma}}.$$

По вектору первоначальных вытяжек рассчитываются основные параметры процесса, при этом рассчитывается первоначальный вектор необходимых натяжений для получения заданной толщины стенки s_k . При этом учитывается, что

$$z_i|_{i=n} = 0. \quad (2.4.16)$$

Граничное условие (2.4.16) говорит о том, что прокатка в последней клетки стана происходит без переднего натяжения.

По вектору вытяжек рассчитывается вектор изменений толщины стенки, (согласно первоначальному вектору вытяжек):

$$s_i = \frac{d_{ki}}{2} - \sqrt{\frac{d_{ki}^2}{4} - \frac{(d_{i-1} - s_{i-1})s_{i-1}}{\prod_{i=1}^n \lambda_i}}; \quad (2.4.17)$$

и первоначальный вектор скорости трубы:

$$v_i = v_0 \cdot \prod_{i=1}^n \lambda_i.$$

Рассчитывается вектор необходимых межклетевых натяжений. Вектор натяжений рассчитывается в обратном порядке (с граничного условия (2.4.16)), путем решения квадратного уравнения относительно натяжения z_{i-1} :

$$\begin{aligned} & -0,042972 \cdot z_{i-1}^2 + (0,082085 - 0,205875 \cdot \varepsilon - 0,2797 \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}) \cdot z_{i-1} + \\ & \frac{\Delta s}{d_{i-1}} - 0,041203 + 0,183877 \cdot \varepsilon + 0,321691 \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} + -0,176 \cdot \varepsilon^2 - \\ & -0,629556 \cdot \left(\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} \right)^2 + 0,001244 \cdot \varepsilon \cdot v - 0,776889 \cdot \varepsilon \cdot \frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} = 0, \end{aligned} \quad (2.4.18)$$

где степень деформации

$$\varepsilon_i = \frac{\frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \cdot B}{\frac{s_i}{d_i} \cdot \left(1 - \frac{s_i}{d_i} \right) \cdot \sqrt{3}}; \quad (2.4.19)$$

скорость деформации

$$\begin{aligned} \xi_i &= \frac{\frac{d_{i-1} - d_i}{d_{i-1}} \cdot v_i \cdot B}{\frac{s_i}{d_i} \cdot \left(1 - \frac{s_i}{d_i} \right) \cdot 5.4 \sqrt{0.5D} \cdot \frac{d_{i-1} - d_i}{d_i}}, \\ B &= 0.87 \frac{s_i}{d_i} \left(2 - \frac{s_i}{d_i} \right) + 0.9 \cdot \bar{z}^3 \cdot \frac{s_i}{d_i}. \end{aligned} \quad (2.4.20)$$

Получен первоначальный вектор параметров процесса прокатки. Далее данные поступают в температурную модель непрерывного процесса прокатки (параграф 2.2). Производится расчет вектора температуры и расчет вектора сопротивления деформации.

После первоначального расчета вектора натяжений, начиная с последней клетки стана, происходит проверка условия (2.4.8). В случае нарушения условия проволакивания или пробуксовывания клетки выполняется уменьшение вытяжки в клетки, которая не прошла условия (2.4.8), например, уменьшение вытяжки вдвое. Далее выполняется вторая итерация с распределением вытяжек следующим образом:

$$\lambda_i = \sqrt[n-m]{\frac{\lambda_{\Sigma}}{\prod_{j=1}^m \lambda_j}},$$

где m - число итераций, при которых произошло перераспределение вытяжки; j - номер клетки, в которой произошло перераспределение вытяжки (то есть так клеть, в которой не выполнилось условие (2.4.8)).

Итерационная процедура продолжается до тех пор, пока система уравнений не удовлетворит условиям (2.4.7) и (2.4.8).

После удовлетворительного распределения вытяжек и натяжений рассчитываются катающие диаметры валков и определяется частота вращения валков:

$$n_i = n_1 \cdot \frac{D_{k1} \cdot \mu_{\Sigma i}}{D_{ki} \cdot \mu_1}.$$

Тогда коэффициент нарастания частоты вращения валков

$$k_{ni} = \frac{n_i}{n_1} = \frac{D_{k1} \cdot \mu_{\Sigma i}}{D_{ki} \cdot \mu_1}.$$

Модель чувствительностей

Для того чтобы выполнить «он-лайн» управление процессом прокатки, требуется регулирование параметров управления посредством управляющих устройств измерения, способные «отслеживать» неизбежные «помехи» средних значений, воздействующих на процесс прокатки и качество, связанное с получением разнотолщинности по длине трубы и заданных контрольных температур в допустимых технологических рамках.

Должны быть вычислены значения ∂MRP - разность между измеренными и расчетными целевыми значениями параметров прокатки (MRP) и соответствующего изменения параметров управления ∂CP . С этой точки зрения, коэффициент чувствительности f параметра прокатки MRP в отношении соответствующего параметра управления CP может быть рассчитан как частная производная, вычисленная в рабочей точке (в соответствии с рисунком 2.10):

$$f = \frac{\partial MRP}{\partial CP}.$$

Такие чувствительности являются быстрой сетевой реакцией к неизбежным ошибкам в расчете основных технологических параметров процесса, которые исполняются системами конечного управления на уровне 1.

Формальное выражение такой функции управления параметра прокатки вообще неопределенно. Эта трудность может быть легко преодолена и оценка такой частной производной

может быть выполнена линеаризацией функции в окрестности рабочей точки P . С этим предположением может быть выполнено быстрое вычисление вышеупомянутого отношения приращений контролируемого параметра, увеличивая значения управляемых параметров прокатки, связывающих рабочую точку P (текущее состояние) и требуемое изменение параметров управления, соответствующее новой рабочей точке P' .

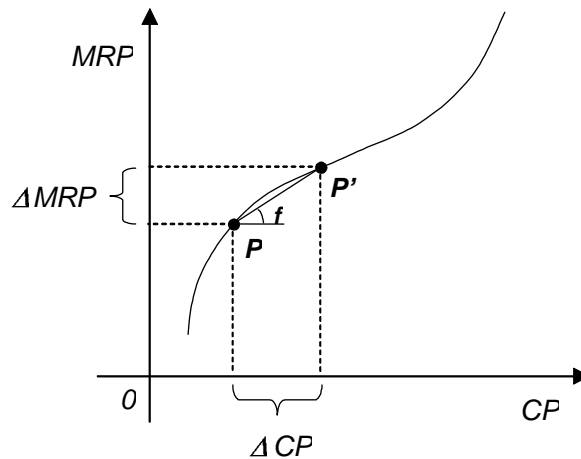


Рисунок 2.10 - Упрощенная линеаризация коэффициента чувствительности

Для оценки чувствительности в отношении только одного параметра вычисление должно быть выполнено, «закрепляя» все другие параметры:

$$\Delta MRP = MRP_{измер} - MRP_{целево},$$

$$\Delta CP = CP_{измер} - CP_{целево}.$$

Изменение вычисляется от текущих условий измерений посредством тех же самых моделей процесса расчета уставок (в частности натяжений и сопел межклетевого охлаждения).

Коэффициент чувствительности может быть рассчитан как отношение между вышеупомянутыми линейными изменениями параметров:

$$f = \frac{\Delta MRP}{\Delta CP}.$$

Процесс разработки чувствительностей предварительным, так как заранее не известен состав управляющего оборудования, состав системы базовой автоматики и набор контрольно-измерительного оборудования.

Предварительно можно утверждать, что в состав контрольно-измерительного оборудования будет входить пирометр на выходе профиля из непрерывного стана и устройства, измеряющие толщину стенку трубу. В соответствии с этим предположением возможно осуществить контур

обратной связи второго уровня (уровень АСУТП) через следующие группы коэффициентов чувствительностей:

- коэффициент чувствительности для динамического управления температурой конца прокатки;
- коэффициент чувствительности для динамического управления толщиной стенки трубы.

Коэффициент чувствительности для динамического управления температурой конца прокатки

Температурные коэффициенты чувствительности для динамического управления температурой конца прокатки уровнем 1 рассчитываются моделью чувствительностей при исполнении контура обратной связи уровня 2 стана непрерывной прокатки. Также коэффициенты чувствительности циклически обновляются моделью во время прокатки. Частота обновления чувствительностей зависит от инерционности систем измерения и исполнительных механизмов.

Можно выделить два вида температурных коэффициентов чувствительностей:

- чувствительности межклетевого охлаждения $\frac{\partial T_{кп}}{\partial H_j}$;

- чувствительности скорости $\frac{\partial \left(\frac{\partial T_{кп}}{\partial H} \right)}{\partial v}$ для каждого коллектора межклетевого

охлаждения и $\frac{\partial T_{кп}}{\partial v}$ для прямого воздействия на температуру конца прокатки;

Коэффициент чувствительности рассчитываются по эталонным значениям, поэтому входными данными для модели расчета чувствительностей является эталонная схема коллекторов межклетевого охлаждения и эталонное значение скорости прокатки. Под эталонной схемой коллекторов и эталонным значение скорости понимается первоначальные значения, которые используются для первоначальной настройки для соответствующей зоны профиля.

Чувствительности системы межклетевого охлаждения

Модель чувствительностей системы межклетевого охлаждения использует для оценки изменения температуры профиля $\Delta T_{кп}$ пирометр на выходе из последней клетки непрерывной группы по отношению к состоянию закрыто/открыто j -го коллектора межклетевого охлаждения, где j – код коллектора, из-за элементарного изменения только одного состояния системы межклетевого охлаждения ΔH_j .

Коэффициенты используются для оценки изменения температуры профиля на выходном пирометре из группы клеток в отношении состояния открыто или закрыто рассматриваемого коллектора по формуле:

$$\Delta T_{кп} = T_{кп} - T_{кп0} = \frac{\partial T_{кп}}{\partial H_j} (H_j - H_{j0}), \quad (2.4.21)$$

где

$T_{кп0}$ - температура на выходе из последней клетки при эталонных условиях;

$H_j = 0$ – если статус коллектора – «закрыто»; $H_j = 1$ – если статус – «открыто».

Чувствительности рассматриваются в статичных устойчивых условиях, т.е. предполагается, что изменение состояния открыто/закрыто коллекторов межклетевого охлаждения сохраняется в течение продолжительного времени, следовательно, их воздействие на температуру конца прокатки профиля полностью сохраняется.

Если уровню 1 необходимо оценить эффект в переходных условиях, он должен оценить время транспортировки, для каждой части профиля, от выбранного коллектора до пирометра на выходе из группы клеток.

Коэффициенты чувствительности скорости

Поскольку скорость прокатки может меняться, следовательно, время прохождения под каждым коллектором тоже меняется. Поскольку вышеуказанные коэффициенты чувствительности для межклетевых коллекторов охлаждения рассчитываются по эталонной скорости, перепад температур в результате охлаждения каждым коллектором должен быть компенсирован, из-за изменения скорости прокатки по отношению к эталонному значению.

Поэтому должны рассматриваться следующие коэффициенты чувствительности:

$$f_v = \frac{\partial \left(\frac{\partial T_{кп}}{\partial H} \right)}{\partial v}, \quad (2.4.22)$$

для использования оценки изменения чувствительности $\frac{\partial T_{кп}}{\partial H_j}$ по отношению к скорости прокатки Δv .

Объединяя уравнения (2.4.21) и (2.4.22), изменения конечной температуры прокатанного профиля на выходе из последней клетки, из-за изменения статуса j -го коллектора межклетевого охлаждения и скорости прокатки, могут быть рассчитаны:

$$\Delta T_{KP} = T_{KP} - T_{KP0} = \left[\frac{\partial T_{KP}}{\partial H_j} + \frac{\partial \left(\frac{\partial T_{KP}}{\partial v} \right)}{\partial H_j} (v - v_0) \right] (H_j - H_{j0}), \quad (2.4.23)$$

где

T_{KP} - пересчитанная температура профиля на выходе из последней клетки;

T_{KP0} - температура на выходе из последней клетки при эталонных условиях;

$H_j = 0$ – если статус коллектора – «закрыто»; $H_j = 1$ – если статус – «открыто»;

v_0 - эталонная скорость прокатки;

$\Delta v = v - v_0$ - изменение скорости прокатки, удовлетворяющее целевому значению установки.

Для оценки изменения температуры профиля, из-за состояния «открыто» или «закрыто» всех предыдущих состояний коллекторов межклетевого охлаждения и изменения скорости прокатки, целесообразно предположить линейность («суммарность» всех воздействий).

Коэффициент чувствительности для динамического управления толщиной стенки трубы

Использование ультразвуковых толщиномеров значительно облегчает измерение толщины стенок труб, изготавливаемых методом экструзии и прокатки. Такие измерения позволяют выявить нарушения характеристик труб по толщине их стенок и обеспечить непрерывный и автоматический контроль концентричности труб без необходимости их разрезания или остановки процесса производства. При этом ультразвуковые толщиномеры позволяют точно измерять толщину стенок по всей длине трубы.

Для непрерывных поточных измерений толщины стенок металлических труб рекомендуется толщиномер модели 25MX PLUS (GE Panametrics). Он обеспечивает проведение измерений в одной или нескольких точках по окружности трубы, что позволяет построить обратную связь второго уровня для корректировки вектора натяжений для получения стенки трубы в заданных допусках.

Модель чувствительностей определяющего вектора межклетевых натяжений для оценки изменения толщины прокатанной трубы использует показания толщиномера, установленного за последней клетью непрерывного стана по отношению к отдельно взятому значению натяжения в межклетевом промежутке, из-за элементарного изменения только одного значения межклетевого натяжения z_i .

Коэффициенты чувствительностей используются для оценки изменения толщины стенки трубы в отношении набора межклетевых натяжений и рассчитываются по формуле:

$$\Delta s_k = s_k - s_{k0} = \frac{\partial s_k}{\partial z_i} (z_i - z_{i0}), \quad (2.4.24)$$

где

s_{k0} - толщина стенки на выходе из последней клетки при эталонных условиях (определенном векторе натяжений);

z_i - натяжение в i -ом межклетевом промежутке.

Таким образом, создан алгоритм, позволяющий производить коррекцию уставок по обратной связи второго уровня.

2.5. Структура системы управления совмещенным процессом прессования-прокатки-регламентированного охлаждения профилей и труб

Основой получения эффективного решения при создании комплексной системы управления технологическим процессом является возможно более точное формализованное описание поведения системы. Поэтому методология системного анализа предусматривает непрерывное улучшение ранее принятых решений за счет адаптации исходной модели к условиям функционирования: накопления информации о текущем состоянии выхода для оценки рассогласования; подготовки рекомендаций о месте, времени и форме управления, его вероятных последствиях на выходе объекта. Этому принципу в полной мере отвечает многослойная концепция адаптации управления производством.

В интегрированной системе управления выделяются четыре уровня.

Первый уровень взаимодействует с объектом непосредственно в реальном времени процесса. Обработанные с датчиков сведения могут обрабатываться (сглаживаться, усредняться, линеаризоваться и т.д.) до передачи их в систему принятия решения для хранения и последующего использования. В задачу текущего контроля событий входит обнаружение событий, влияющих на решения по управлению. Эти события могут инициировать выдачу управляющего воздействия, выдачу сигнала на завершение предшествующего задания, введение новых значений управляемых параметров, изменение режима работы. Функция прямого регулирования первого уровня реализует цель и стратегию, определенную на втором уровне.

Второй уровень устанавливает цель или задания, подлежащие реализации на первом уровне. В нормальном режиме целью может быть оптимальное управление на основе принятой математической модели. В аварийных ситуациях могут получать приоритет модифицированные модели для пересчета нарушенных планов. Второй уровень определяет остановки для управляющих устройств первого уровня, которые реализуются через заранее определенную последовательность действий.

Третий и четвертый уровень систем автоматизации предприятий связывает в единый комплекс цеховые или агрегатные вторые уровни. Такая общая связь позволяет построить эффективную систему планирования производства и осуществить сквозной анализ качества.

В литературе часто встречаются решения по созданию комплексных систем управления непрерывными трубопрокатными станами [2, 8]. Основные задачи таких систем: быстрая настройка стана; динамическое регулирование натяжений за счет управления скоростей; уменьшение длины утолщенных концов прокатываемой трубы; сопровождение прокатываемого профиля с привязкой технологических параметров к металлургической длине для последующего анализа; избежание превышения нагрузки на оборудование стана.

В работе [2] АСУ ТП спроектирована из двух взаимосвязанных уровня. Второй уровень содержит в себе базу данных с таблицами программ прокатки, которые создаются (рассчитываются) заранее. Программа прокатки выбирается исходя из параметров заготовки, калибровки валков стана и необходимой конечной геометрии прокатанной трубы. Таким образом, регулирующим воздействием системы является задание и корректировка угловых скоростей вращения двигателей главных приводов стана во время прокатки, что позволяет изменить величину натяжения между клетями и соответственно управлять точностью проката. К недостатком построения такой системы можно отнести высокие требования к точности нагрева и перепада температуры по длине заготовки; невозможность создания новой программы прокатки «на лету» в случае изменения условий прокатки (недостаточный нагрев трубной заготовки, несоответствие геометрическим характеристикам трубной заготовки и т.д.); невозможность управления температурой трубы.

Описанных недостатков лишена система управления трубопрокатным станом компании «Kocks» [8]. Помимо системы регулирования натяжений по длине трубы для уменьшения длины утолщенных концов в состав системы входит модуль позволяющий производить прокат со «свободным размером». Программа прокатки создается отдельно на каждую прокатываемую трубу или партию труб, что позволяет прокатывать трубы с различным внешним диаметром (в небольших диапазонах) и толщиной стенки из одного размера трубной заготовки. Это достигается за счет управления регулируемыми клетями.

Как было отмечено выше, одной из основных проблем прокатки на редуционно-растяжных станах является повышенный расход металла за счет обрезки утолщенных концов труб. Известны способы, позволяющие сократить (или избежать) утолщение концов труб [2, 8], за счет применения большего натяжения во время прокатки головы и хвоста полосы. Также определенный вклад вносит неравномерность температуры трубной заготовки по ее длине.

Для предлагаемой в данной работе композиционной структуре стана совмещенного прессования и редуционно-растяжной прокатки труб и сплошных профилей, вышеописанные методы построения систем автоматического управления не подходят по многим причинам.

Ниже предложен вариант построения системы управления процессом редуционно-растяжной прокатки, позволяющий избежать вышеуказанные проблемы.

Автоматическая система управления технологическим процессом совмещения прессования и непрерывной прокатки простых сплошных профилей и труб состоит из двух уровней: базовый уровень и уровень 2. Уровень 2 АСУ ТП построен на математических моделях процесса непрерывной прокатки профилей. В состав уровня 2 входят следующие взаимосвязанные математические модели:

- модель сопротивления деформации;
- модель управления температурой на промежутке пресс – непрерывный стан;
- модель температуры непрерывного стана;
- модель температуры установки контролируемого охлаждения;
- модель распределения обжатий профиля по клетям стана;
- модель расчета уставок для первоначальной настройки стана;
- модель расчета коэффициентов чувствительностей для обновления настройки.

Упрощенная схема функциональной связи моделей второго уровня и базового уровня (уровня 1) АСУ ТП приведена на рисунке 2.11. Задачей первого уровня является процесс обработки конечных данных (уставок) для приведения в действия исполнительных механизмов оборудования непрерывного прокатного стана. Вектор уставок состоит из следующих установочных параметров:

- уставки на межклетевые натяжения;
- уставки на частоту вращения валков;
- шаблон межклетевых коллекторов охлаждения;
- шаблон коллекторов охлаждения установки предварительного охлаждения;
- статус тепловых экранов установки предварительного охлаждения.

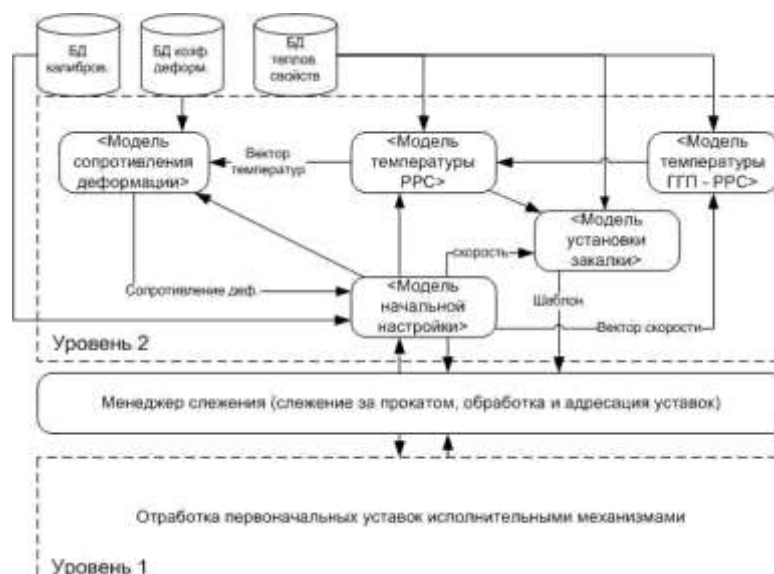


Рисунок 2.11 - Функциональная связь моделей АСУ ТП

Вектор таких уставок не является статичным во время прокатки каждого отдельного профиля. Во время прокатки происходит измерение контролируемых параметров на уровне 1, которые посредством алгоритмов менеджера слежений (алгоритмы этой системы отслеживают координаты профиля во время его движения вдоль линии стана) привязываются к координатам стана. Вектор измерений для осуществления коррекции по обратной связи уровня 2 состоит из следующих параметров (в соответствии с рисунком 2.12):

- показания пирометра P0 – температура прессования;
- скорость выхода профиля из пресса;
- показания пирометра P1 – температура начала прокатки;
- показания пирометра P2 – температура конца прокатки;
- показания пирометра P3 – температура охлажденного профиля.

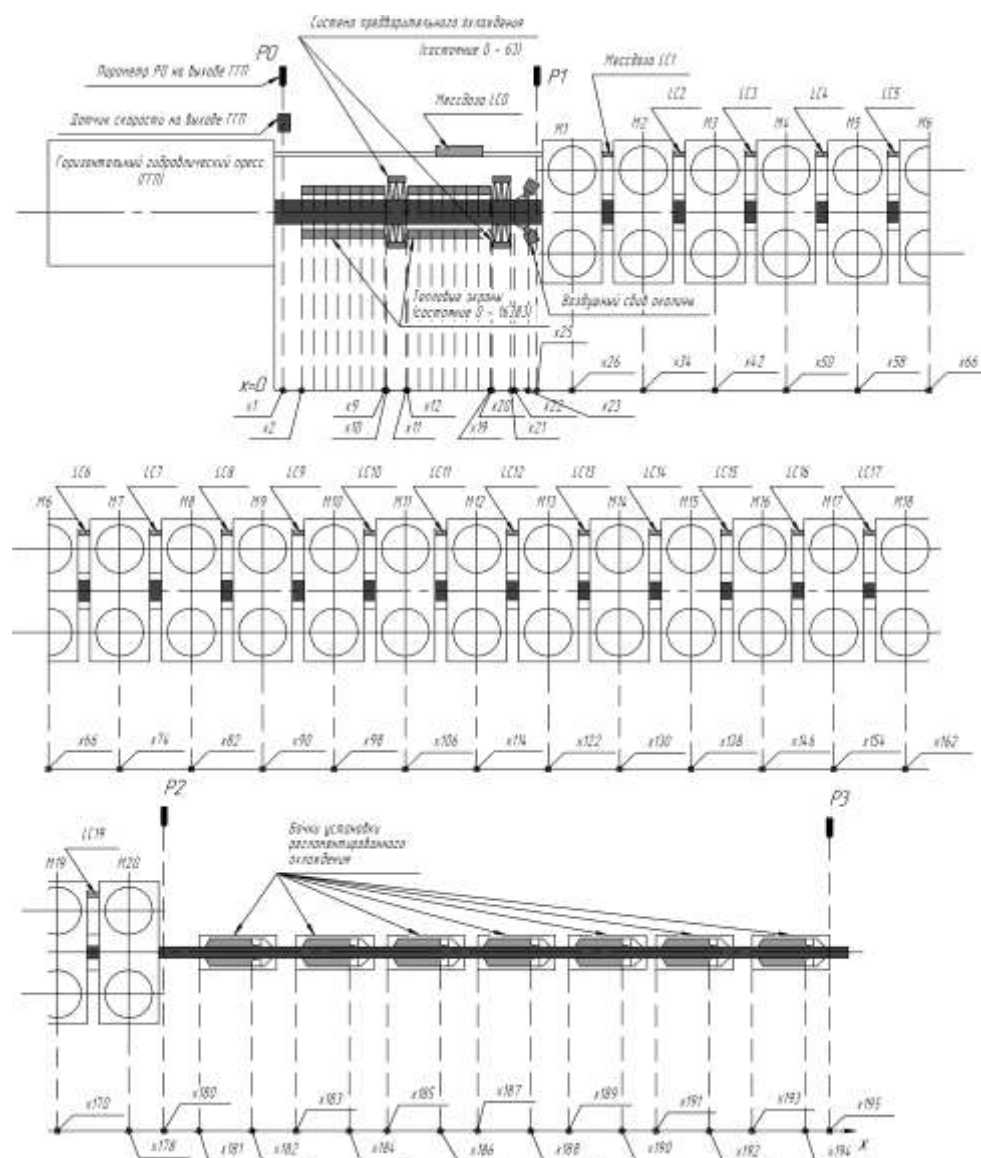


Рисунок 2.12 - Структурная схема прокатного стана

Данные измерений менеджером слежения привязываются к продольной координате прокатываемого профиля. Начальная координата $x = 0$ соответствует точке выхода прессованного профиля из горизонтального гидравлического пресса, и соответственно скорость на участке $x \in [x_0, x_{26}]$ соответствует скорости выхода профиля из пресса

$$v|_{x \in [x_0, x_{26}]} = v_{\text{пресс}}.$$

Скорость профиля на участке $x \in [x_{26}, x_{178}]$ является переменной и будет различной для каждого межклетевого промежутка в зависимости от вытяжки профиля в каждой клетке:

$$v_i = v_{\text{пресс}} \cdot \prod_{i=0}^{20} \lambda_i.$$

Зная системное время замера любого параметра и координаты всех клеток, возможно привязать значение каждого параметра к конкретной точке профиля.

В состав системы входит база данных, которая структурно состоит из отдельных баз данных:

- база данных калибровки валков, установленной в данный момент на стане;
- база данных коэффициентов сопротивления деформации прокатываемого металла;
- база данных теплофизических свойств прокатываемого металла.

Работа системы управления технологическим процессом является многоуровневой (в составе математических моделей). На каждом уровне управления достигается группа целевых технологических показателей процесса. Выделим два основных уровня управления.

Первый уровень выполняет управления по двум параметрам: температура конца прокатки (пирометр P2) и толщина стенки трубы на выходе из стана горячей прокатки (управляется посредством моделей чувствительностей). При управлении температурой конца прокатки система имеет несколько регуляторов: шаблон системы межклетевого охлаждения, шаблон системы предварительного охлаждения и скорость прессования. Система управления шаблонами охлаждения имеет ограниченный диапазон управления температурой конца прокатки, который зависит от эффективности систем охлаждения. Как было описано выше, прессование профиля может происходить как с увеличением температуры, так и с понижением. Уровень отклонения температуры при прессовании связан со многими параметрами, в частности, начальным нагревом прессуемого слитка, нагревом прессового инструмента, скоростью прессования и т.д. Таким образом, при управлении изменением температуры можно выделить один управляющий параметр для построения АСУ ТП – это скорость прессования. Следовательно, первая стадия управления в АСУ ТП построена из следующих шагов:

1. происходит прессование с заданной исходной скоростью прессования;
2. выполняется замер температуры прессования (пирометр P0, в соответствии с рисунком 2.12);
3. математическая модель системы предварительного охлаждения оценивает возможность достижения заданной температуры начала прокатки на пирометре P1. После успешного завершения работы математической модели системы предварительного охлаждения устанавливает шаблоны тепловых панелей и сопел охлаждения (смотреть блок схему на рисунке 2.5) и запускается выполнение следующего шага (шаг 4). В случае ошибки, свидетельствующей о невозможности достичь заданной температуры (см. блок схему на рисунке 2.5), генерируется сообщение в АСУ пресса о увеличении/уменьшении скорости прессования. Система выполняет управление по конечно рассчитанным уставкам до их обновления и переходит к шагу 1;
4. выполняется расчет скоростного и деформационного режима прокатки совместно с моделью температуры непрерывного стана, опираясь на текущую скорость прессования. Модель оценивает возможность получения заданной температуры конца прокатки, достаточной для

выполнения закалки профиля. В случае успешной проверки возможности достижение заданной температуры модель переходит к шагу 5. В случае установления невозможности достижения заданной температуры модель генерирует сообщение в АСУ пресса об увеличении/уменьшении скорости прессования. Система выполняет управление по конечно рассчитанным уставкам до их обновления и переходит к шагу 1;

5. моделью установки контролируемого охлаждения выполняется расчет уставок оборудования установки охлаждения.

Второй уровень выполняет управления по температуре конца прокатки (пирометр P2). Во втором уровне управления температурой конца прокатки система не имеет возможности регулирования скорости прессования. Второй уровень управляет регуляторами: шаблон системы межклетевого охлаждения, шаблон системы предварительного охлаждения при этом использует модели расчета чувствительностей и запускается после окончательной уставки по скорости прессования, выполненной на первом уровне. Этот уровень управляет шаблонами систем охлаждения, и в случае выпадения за диапазон регулирования запускается первый уровень управления.

В качестве конкретного примера численной реализации алгоритма управления совмещенным процессом прессования – редукионно-растяжной прокатки выполнен расчет технологических и управляющих параметров при изготовлении горячекатаных труб 16x1,5 из коррозионно-стойкой стали из горячепрессованной заготовки.

2.6. Список использованных источников

1. *Готлиб Б.М.* Основы статистической теории обработки металлов давлением /Б.М. Готлиб, И.Я. Добычин, В.М. Баранчиков. - М.: Металлургия, 1980. – 168 с.
2. *Бодров Ю.В.* Совершенствование прокатки труб на непрерывном и редуционном станах ТПА-80 с использованием АСУТП /Ю.В. Бодров, Д.В. Овчинников, А.Ю. Бодров, А.А. Богатов, В.В. Харитонов //Достижения в теории и практике трубного производства. Сб. науч. трудов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – с. 287 - 292.
3. *Лыков А.В.* Тепло- и массообмен с окружающей газовой средой /А.В. Лыков, Т.Л. Перельман. - Минск: Наука и техника, 1965. - 238с.
4. *Brennecke N.* Neue Hutte /N. Brennecke, K. Zurdel. - №7, 1975. – р. 410 – 413.
5. *Кугушин А.А.* Высокоскоростная прокатка катанки /А.А. Кугушин, Ю.А. Попов. - М.: Металлургия, 1982. – 144 с.
6. *Столетний Д.М.* Пробуксовка, проволакивание, и разрыв в редуционных станах /Д.М. Столетний: Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». - №9, 2005. с. 41-44.
7. *Столетний Д.М.* Скоростные режимы редуционного стана /Д.М. Столетний: Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия». - №10, 2005. – с. 58-62.
8. *Аммерлинг В.Ю.* Редуцирование с натяжением и точная калибровка при производстве труб / В.Ю. Аммерлинг, Й. Сурмунд //Труды шестого конгресса прокатчиков. - Том 2. М.: Объединение прокатчиков, 2005. – с. 239 – 243.

3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ»

3.1. Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс

3.1.1. Разработки, полученные в ходе выполнения данного проекта, включаемые в образовательный процесс

Разработан новый подход расчета термодинамических свойств бинарных расплавов переходных металлов, основанный на совместном использовании методов сильной связи, модельного псевдопотенциала и вариационного метода термодинамической теории возмущений. Впервые произведен частичный учет обменного взаимодействия между d -электронным состоянием путем введения недиагональных по магнитному квантовому числу элементов в выражения, описывающих $d-d$ взаимодействия. Обнаружено, что данный учет недостаточен для влияния на термодинамические свойства. В рамках предложенного подхода рассчитаны некоторые термодинамические характеристики смешения расплавов Fe-Co. Хорошее согласие полученных результатов с экспериментальными данными и потенциальная возможность дальнейшего усовершенствования данного метода позволяют надеяться на его использование в перспективе для прогнозирования широкого круга свойств двухкомпонентных расплавов переходных металлов.

Разработана диалоговая компьютерная программа, алгоритмы и соответствующее программное обеспечение для расчета термодинамических характеристик металлических систем из первых принципов. Проведен расчет эффективных парных потенциалов для простых металлов и их бинарных расплавов с использованием истинных волновых функций электронов проводимости. Показано, что эффективные парные потенциалы в рассматриваемых металлических системах зависят от среднего атомного объема, от концентрации компонентов и от способа учета обменно-корреляционного взаимодействия между электронами проводимости. Расчеты, проведенные для ОЦК, ГЦК и ГПУ структур, согласуются с экспериментальными данными с точностью до 5 %.

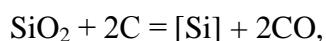
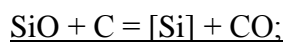
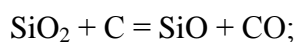
Изучен фазовый состав квазибинарных систем на основе ванадия при различных температурах. Установлено, что в системах не происходит образования промежуточных соединений. Вид равновесной фазовой диаграммы определяют твердые растворы на основе кристаллических структур исследуемых модификаций пированадатов соответствующих компонентов и области их существования [1].

Известно, что при холодном ходе доменных печей, работающих на древесном угле печей и повышенном содержании FeO в шлаках, условия для развития процессов восстановления и кремния и титана весьма ограничены.

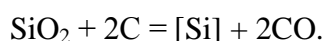
Проблемы проплавки титаномагнетитов появились с переходом на кокс (зола кокса) и повышением температур нагрева дутья (ростом теоретической температуры горения и понижением FeO в шлаке), факторами, активизирующими процессы восстановления титана.

Возможные реакции восстановления Si и Ti.

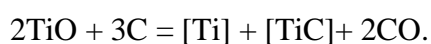
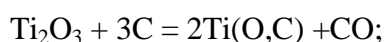
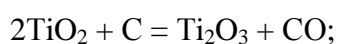
Через возгон:



из расплава:



Из расплава:



Развитие процессов восстановления титана печи по схеме



приводит к:

1. образованию нерастворимой в шлаке и ограниченно растворимой в чугуна карбидной фазы TiC;
2. накоплению ее на контактных поверхностях шлак-металл (греналь), шлак-кокс (неплавкие массы);
3. и, как следствие, увеличению потерь металла со шлаком, снижению дренажной способности коксовой насадки и уменьшению активного объема горна.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в Институте металлургии УрО РАН, Уральском институте металлов, Уральском государственном техническом университете - УПИ по изучению взаимодействия жидких металла и шлака, в том числе при переработке титаномагнетитов, позволили внести значительный вклад в разработку и реализацию технологии плавки титаномагнетитов Качканарского месторождения в доменных печах № 5 и № 6 объемом 2200 м³ Нижнетагильского металлургического комбината. Это изменение состава и свойств чугуна путем подбора параметров дутья и состава шлака, включая и добавки марганца. Определяющим критерием в решении задачи является понижение содержания кремния в чугунах до 0,1 % и менее, влияющего на растворимость титана в металле, с целью снижения вероятности выделения титансодержащих фаз на коксовой насадке.

Устойчивость шлаков древесноугольной доменной плавки обеспечивало высокое содержание закиси железа FeO .

Ее роль сводится к стабилизации в шлаках комплексов с определенным отношением трех- и четырехвалентного титана, что затормаживает его восстановление до низших валентностей. Поэтому FeO сохраняется в шлаках до 4-5 % при проплавке титаномagnetитов в руднотермических печах.

В доменных печах функцию FeO может выполнять закись марганца, т.к. Mn в доменных печах восстанавливается только на 60-65 %.

На рисунке 3.1 приведено влияние MnO на температуру кристаллизации Ti - шлаков, а на рисунке 3.2 – влияние MnO на вязкость доменного шлака с 10 % TiO_2 .

Таким образом, при введении марганца в шихту доменных печей:

- понижаются вязкость и температура начала кристаллизации титансодержащих шлаков;
- затормаживаются процессы восстановления титана в горне печи и стабилизируется отношение $\text{Ti}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ в шлаке и их свойства.

Поэтому:

- возрастает дренажная способность коксовой насадки;
- печи слабее реагируют на изменение качества кокса (что особо важно в существующих условиях работы доменных цехов);
- создаются условия для повышения качества чугуна по содержанию серы, снижения потерь металла со шлаком, увеличения извлечения ванадия.

На рисунке 3.3 показана взаимосвязь MnO в шлаке с работой горна и потерями металла.

Определяющими критериями в новой технологии выплавки ванадиевых чугунов явились:

1. снижение содержания кремния в чугунах с 0,1 до 0,05 %;
2. повышение основности шлаков с 1,2 до 1,25-1,30;
3. повышение давления на колошнике печи с 1,8 до 2,2 ати.

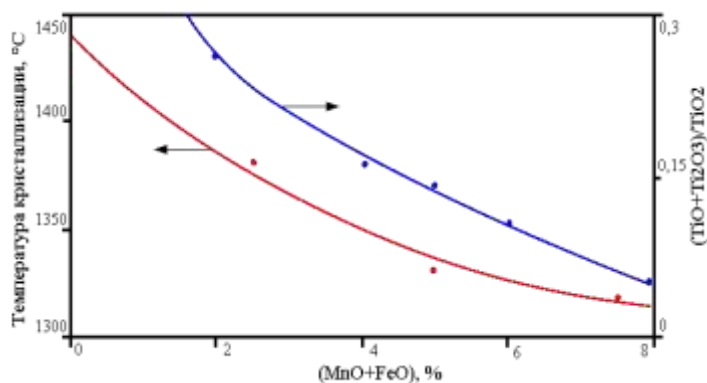


Рисунок 3.1 - Влияние MnO на температуру кристаллизации Ti - шлаков

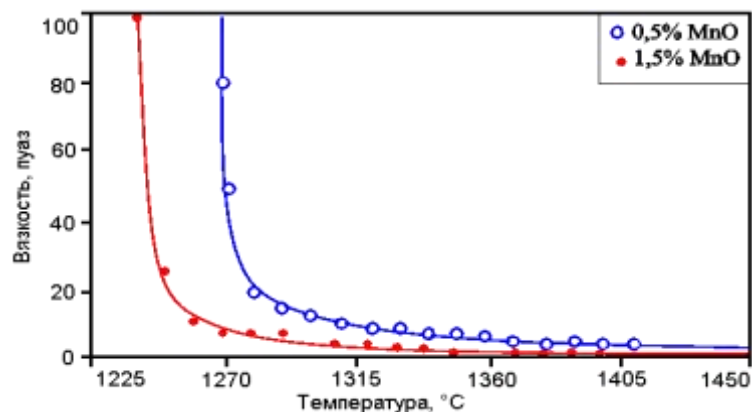


Рисунок 3.2 - Влияние MnO на вязкость доменного шлака с 10 % TiO₂

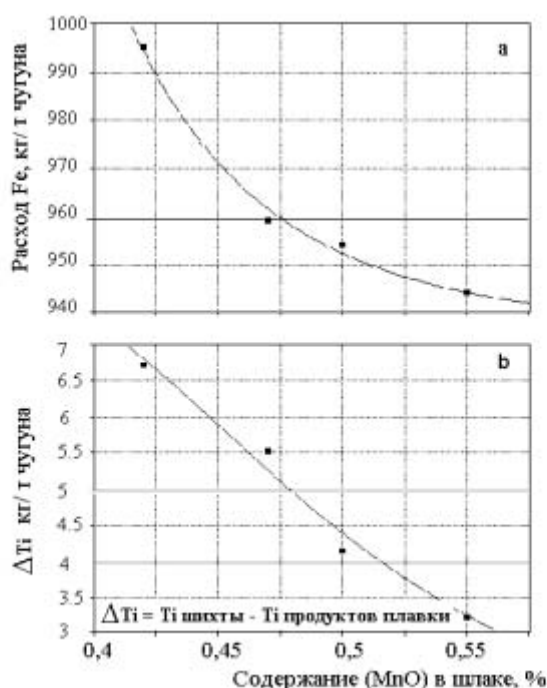


Рисунок 3.3 - MnO в шлаке, работа горна и потери металла

Истощение запасов традиционного магнетитового сырья вынуждает пересматривать отношение к способам производства металла и схемам переработки комплексных руд с учетом запросов рынка и использования ресурсов регионов. Руды с невысоким содержанием титана, типа гусевогорских, перерабатываются по металлургической схеме, включающей выплавку чугунов в доменных печах. Поскольку с переходом на собственно качканарские руды ожидается повышение титана в железорудном сырье, а объемы печей для его переплавки возрастают, то предстоит пересматривать технологические решения в доменном переделе. Это особенно относится к печам большого объема 2200 м³ [1].

Важным моментом в совершенствовании технологии доменной плавки является использование математического моделирования доменного процесса, которое позволяет изучать

выходные параметры доменной плавки (расход кокса; производительность; степень использования восстановительного потенциала газа; температурные поля шихты и газа, в том числе трехмерные; линии равных степеней восстановления) при изменении входных параметров (параметры дутья; параметры шихты, включая распределение по радиусу и окружности; профиль печи и др.) без промышленных испытаний, в камеральном режиме.

Нами используется следующий подход к решению практических задач: лабораторные исследования на экспериментальных установках с определением качественных характеристик железорудного сырья и кокса, аналитическое исследование с помощью математических моделей [2, 3], опытно-промышленные и промышленные испытания.

Комплекс математических моделей доменного процесса включает совместно работающие на основе единой базы данных двумерные модели газодинамики, теплообмена, восстановления, а также одну из балансовых моделей, позволяющих определить расход кокса, расход дутья, выход газа, температуру фурменного очага, используемые как входные параметры двумерных моделей:

- *Балансовая равновесная математическая модель.* Анализ работы многих доменных печей за длительный период позволил сделать предположение, что в определенной зоне печи на стадии восстановления магнетита реакция восстановления вюститита стремится к термодинамическому равновесию, которое связано с фактически реализуемым в доменной печи зональным режимом восстановления оксидов железа и реакциями регенерации оксида углерода и водорода. Эта модель позволила разработать новую методику определения эффективности работы доменных печей [4].
- *Балансовая логико-статистическая модель.* Она включает в себя балансовую модель, наиболее значимые с точки зрения конечных результатов закономерности тепло- и массообмена, статистические данные. В качестве исходных данных в балансовой логико-статистической модели используются только независимые переменные, в том числе характеристики качества железорудных материалов; внутренние параметры работы печи, в частности, степень использования восстановительного потенциала горнового газа и температура колошникового газа являются результатами расчета. Выходным параметром, наряду с другими, является производительность печи, что принципиально важно.

Эти балансовые математические модели могут использоваться как самостоятельно, так и в комплексе моделей.

- *Математическая модель газодинамики.* Практически реализована методика расчета газодинамической сетки и поля скоростей газа с использованием теории функций комплексного переменного при решении задачи о точечном источнике. Учитывается реально существующий в доменной печи закон изменения давления по высоте. Сделано предположение о подобии двумерных полей скоростей движения газа и шихты.

- *Математическая модель теплообмена.* Получено аналитическое решение задачи о нагреве слоя при противоточном движении шихты и газа в случае произвольного изменения по высоте печи коэффициента теплоотдачи, теплоемкости потока газа и отношения теплоемкостей потоков шихты и газа, с использованием поля скоростей газа.
- *Математическая модель восстановления.* Выполнено численное решение системы дифференциальных уравнений массообмена и восстановления при введении в нее в явном виде модуля скорости газа, получаемого из математической модели газодинамики, а также с учетом зависимости суммарного коэффициента массообмена, как от температуры, так и от степени восстановления.

Комплекс моделей использован для решения практических задач доменной плавки.

Балансовая (равновесная) модель. Разработаны: методика расчета минимального расхода кокса в доменной плавке и методика определения эффективности мероприятий, направленных на снижение расхода кокса. Показана эффективность использования высокопотенциальной теплоты в доменной плавке. Наиболее оптимальной с точки зрения теплообмена при использовании высокопотенциальной теплоты является подача восстановительного газа, которая обеспечивает необходимые температурные условия во всем объеме печи. Наиболее эффективно использование этого способа при плавке комплексных железных руд, позволяющего не только существенно снизить расход кокса, но повысить качество шлака за счет повышения содержания в нем ценных компонентов – Al_2O_3 , TiO_2 и др. Приведены результаты работ Института металлургии УрО РАН совместно с металлургическим заводом им. А.К. Серова, Карагандинским металлургическим комбинатом и Уралмеханобром по исследованию влияния восстановимости железорудного сырья на показатели доменной плавки (разработка технологии доменной плавки низкозакисных агломератов). Здесь широко использовались математические модели доменного процесса. Выполнено определение резерва расхода кокса при выплавке низкопримесных чугунов, например, низкремнистых.

Двумерные математические модели (газодинамики, теплообмена и восстановления). Выполнен анализ влияния некоторых параметров на характер двумерных полей скоростей и температур: положения фурменного очага, температуры фурменного очага, системы загрузки, газопроницаемости шихты, окружной неравномерности, перепада давления. Перспектива развития доменного производства неразрывно связана с совершенствованием таких технических решений, как использование комбинированного дутья с высокими расходами природного газа и кислорода и вдувание пылеугольного топлива. Известно, что в опытных плавках при содержании кислорода в дутье 35 и 40 % возникли трудности, связанные с похолоданием шахты. Эксперимент показал, что увеличение содержания кислорода и расхода природного газа имеет предел. При этом критической областью является рудный гребень. Выравнивание рудной нагрузки по радиусу

позволит, согласно расчетам, повысить содержание кислорода в дутье до 45-50 %. Технология доменной плавки с использованием угольной пыли находит все большее применение. Выполнены расчеты двумерных температурных полей и параметров, характеризующих радиальную неравномерность, для доменной плавки при вдувании угольной пыли. Показано, что по мере увеличения расхода угольной пыли, в связи с уменьшением доли кокса, и увеличением газодинамического сопротивления столба шихты, все большие требования должны предъявляться к качеству железорудного сырья и кокса. В последние годы при выплавке ванадиевых чугунов наметилась тенденция существенного улучшения показателей работы печей за счёт оптимизации параметров дутья и состава шихты. Проведено сопоставление параметров, определяющих особенности процессов на печах, выплавляющих ванадиевые чугуны, в сравнении с печами, выплавляющими обычные передельные чугуны. Проанализировано влияние уровня засыпи на ход двумерных процессов газодинамики и теплообмена, как при кратковременном его понижении, так и при длительной работе. Выявлено влияние восстановимости железорудного сырья на процессы, протекающие в доменной печи в двумерном варианте. Проанализирована особенность плавки и зон когезии при переработке лисаковского обжигмагнитного концентрата, титано-магнетитов Качканарского месторождения (включая разноосновное сырье), Кусинского, ПО “Апатит”, Серовского месторождения бурохромистых руд. Исследовано влияние профиля доменной печи на ход процессов газодинамики, теплообмена и восстановления по радиусу и высоте доменной печи. Комплекс двумерных математических моделей доменного процесса позволил автору проанализировать изменение характера температурных и скоростных полей при отклонениях от нормального хода доменного процесса – нарушении теплообмена, окружной неравномерности (включая вдувание угольной пыли), тихом ходе, нарушении графика выпусков. Расчетами, с помощью математических моделей, показана возможность значительного воздействия на температурный режим доменного процесса, при выплавке низкокремнистых чугунов, изменением диаметра фурм. Аналогичное влияние оказывает и изменение высова фурм. Влияние уменьшения диаметра фурм по знаку соответствует влиянию увеличения высова фурм. Также проанализировано изменение протекания процессов при выдувке доменной печи.

Предложена прогнозная модель оценки качества кокса, основанная на многочисленных статистических, экспериментальных и литературных данных. В основе предложенной модели лежит использование в качестве исходных данных показатели качества углей по международной системе кодификации (Quality specifications according International System Codification), используемых при коксовании. Важно отметить, что такие сертификаты качества, как правило, используются технологическим персоналом предприятий, и представленной в них информации вполне достаточно для предварительных анализов и расчетов. Введено понятие базового варианта с фиксированными параметрами коксования, что позволяет в случае отсутствия каких-либо

данных, использовать соответствующие значения базового варианта без риска выйти за рамки экстраполяции влияния какого-либо фактора, поскольку в базовый вариант уже заложен среднестатистический опыт работы достаточно большого количества коксохимических предприятий. Кроме того, такой подход обеспечивает достаточно простую возможность уточнения и расширения числа факторов, влияющих на ход коксования за счет корректировки или добавления соответствующих зависимостей [5].

Адекватность модели проверяли на примере работы Губахинского КХЗ, работающего на смеси привозных углей Кузнецкого и Печорского бассейнов – ОФ Распадская (Распадская УК), ЦОФ Печорская (Воркутауголь), ЦОФ Березовская (Кемеровококс), ОФ Каро (Кемеровразрезуголь), ЦОФ Сибирь и ОФ Нюрнгринская (Мечел).

Опыт исследований советских и зарубежных авторов, в области получения качественных агломератов, обычно приводит к альтернативе выбора прочности и восстановимости. Разработка перспективных технологий получения агломерата может осуществляться несколькими путями. Один из них состоит в оптимизации условий кристаллизации связки в период охлаждения спека. Но есть и другой путь, заключающийся в совершенствовании качества агломерата посредством воздействия микродобавок на структуру и физико-химические свойства связки. Не останавливаясь на роли связки при шлакообразовании в процессе доменной плавки, отметим лишь требования, предъявляемые к ней с позиций качества агломерата: связка должна обеспечивать одновременно прочность и восстановимость спека. Наиболее, на наш взгляд, перспективным путем является совершенствование структуры и свойств связки путем ее модифицирования микродобавками. Роль их состоит, во-первых, в стабилизации стеклообразного состояния, во-вторых, в увеличении микропористости и, в-третьих, в понижении уровня термических напряжений в спеке. Сформулированы принципы использования микродобавок бария и стронция в производстве агломерата.

При рассмотрении альтернативных способов (агломерат и окатыши) установлено, что технологически и экологически рациональным является введение добавок оксида бария в состав агломерата. Для достижения максимального понижения вязкости шлака достаточно иметь в агломерате не более 1,5 % ВаО. Кроме того, обнаружено, что введение даже незначительных количеств оксида бария (0,1-0,5% ВаО) в состав широкого класса агломератов существенно улучшает их металлургические свойства.

На рисунке 3.4 приводятся зависимости от содержания ВаО показателей холодной прочности (барабан фракций +5 мм и –0,5 мм) лабораторных титано-магнетитовых агломератов, полученные испытаниями по ГОСТ 15137-77.

На рисунке 3.5 приводятся зависимости от содержания ВаО показателей горячей прочности (+10мм) и восстановимости (φ) аналогичных агломератов, полученные на установке Линдер по

ГОСТ 19575-84.

За исключением прочности при восстановлении, которая несколько понижается, все остальные служебные характеристики агломератов при микродобавках оксида бария значительно повышается. Но самое важное и решающее влияние, по нашему мнению, оказывают микродобавки оксида бария на закономерности формирования первичных доменных шлаков и температурный интервал размягчения агломератов.

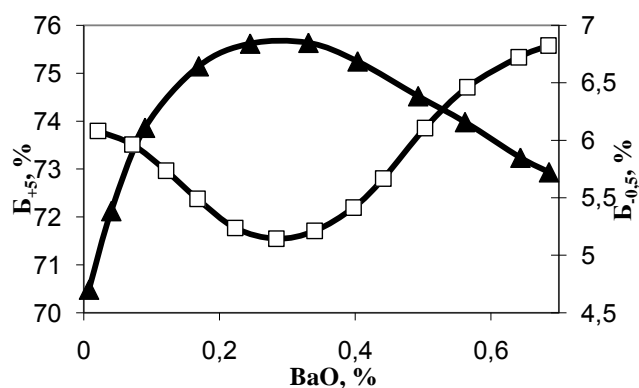


Рисунок 3.4 - Зависимость показателей холодной прочности от содержания BaO в агломерате

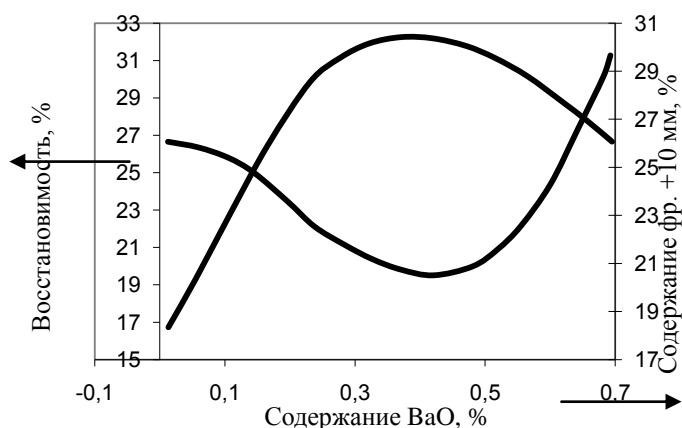


Рисунок 3.5 - Зависимость восстановимости и прочности при восстановлении по ГОСТ 19575-84 от содержания BaO в агломерате

Выявлены особенности математического моделирования доменной плавки титано-магнетитовых руд. При разработке математических моделей доменной плавки, как правило, используются общие подходы, не разделяя типы проплавления руд. Однако в наиболее значимые, с точки зрения точности расчетов, блоки моделей вводятся поправки, уточняющие влияние титано-магнетитовых руд. Так, для математических моделей ИМЕТ УрО РАН можно отметить два основных блока: основность шлака и температура шлака. Выполнены: разработка алгоритма и программы коррекции основности шлака и разработка алгоритма и программы

определения температур шлака на основе диаграмм состояния 4-х компонентных шлаковых систем [5].

Основная задача при выплавке низкопримесных чугунов – подавление восстановления примесей. Это может быть сделано за счет форсировки доменной печи, совершенствования газодинамического режима путем изменения количества фурм, их диаметра и высова. Кроме того, большое значение имеет распределение рудной нагрузки по радиусу печи. Резерв форсировки доменной печи за счет снижения содержания примесей в чугуне, например, по расходу кокса, может быть определен с помощью балансовой равновесной математической модели. Существование химического равновесия в отдельных зонах доменной печи позволяет определить предельные значения показателей доменной плавки при данных параметрах шихты и дутья [5].

Сформулированные требования, позволяющие снизить отрицательные последствия плавки титаномagnetитов, связаны с совершенствованием технологии доменной плавки.

1. Колебания теплового уровня доменной плавки должны быть сведены к минимуму. В этой связи необходима разработка предложений, направленных на стабилизацию теплового состояния печи [6].
2. По мере возможности необходимо стремиться к сокращению поступления титана в печь с шихтовыми материалами.
3. Не допускать накопления неплавких титанистых масс в горне доменной печи, с этой целью постоянно контролировать баланс титана.
4. Строго выдерживать график выпусков.
5. Обеспечить распределение природного газа по фурмам пропорционально расходу дутья.
6. Периодически промывать горн путем перевода печи на выплавку чугуна из малотитанистой шихты.
7. Использовать качественный кокс с низкой реакционной способностью.

В настоящее время возрастает значение регулирования доменной плавки. Повышается роль разработанных на основе математических способов регулирования теплового состояния доменной печи. Внедрение на доменных печах компьютерных систем сбора и обработки информации позволяют по-новому решать вопросы управления режимами их работы. Так, например, предложены способы: на основе комплексных технологических параметров (КТП) и вероятностно-функционального регулирования.

Высокие требования, предъявляемые к стабильности теплового состояния доменных печей, выплавляющих ванадиевый чугун, и перспектива вовлечения в эксплуатацию высокотитанистых руд Среднего и Южного Урала, а также Чинейского месторождения, придают особую актуальность разработке замкнутой системы автоматического регулирования теплового состояния доменной печи. К сожалению, попытки решить эту проблему с помощью “советчиков”

мастера, систем искусственного интеллекта и экспертных систем, ощутимых успехов пока не принесли. Хотя использование экспертных систем не исключается, но обязательно одновременно с применением математических моделей, включающих описание явлений доменной плавки, и накопленного опыта технологов-доменщиков.

В основе вероятностно-функционального способа регулирования лежит принцип непрерывного высокочастотного и знакопеременного воздействия на доменную печь в соответствии со знаками отклонений теплового состояния от нормального, которые (как и знаки воздействий) имеют вероятностный (случайный) характер. Функциональность же регулирования обеспечивается совокупностью воздействий в сочетании со 100% оперативной обратной связью по регулирующему параметру, дополненной обратной связью по конечному результату регулирования, включенной в аппарат адаптации алгоритма.

Уравнение теплового баланса доменной плавки, представляющее собой комбинацию из 4-х алгоритмов, составлено таким образом, чтобы в максимальной степени использовать возможность сокращения однородных статей теплового баланса с тем, чтобы уменьшить число и “стоимость” источников случайных погрешностей. При этом, в двух алгоритмах одним из основных носителей информации о тепловом состоянии доменной печи является скорость схода шихты, а состав колошникового газа вообще не используется, тогда как в двух других - наоборот.

КТП представляют собой сочетания двух технологических параметров, из которых первый является ведущим, а второй - ведомым, т.е. принудительно изменяемым вслед за ведущим в определенном соотношении, названном коэффициентом связи ($K_{св}$). При этом в приемах ведения печи практически ничего не изменяется. Мастер печи как обычно, в соответствии со своей субъективной оценкой теплового состояния печи, изменяет регулирующий параметр, который при включенной системе становится ведущим [6].

Новизна разработанного алгоритма регулирования теплового состояния доменной печи на основе КТП заключается в том, что расход природного газа ставится в зависимость от текущих значений всех четырех параметров дутья. При этом увеличивается мощность воздействия за счет суммирования влияний нескольких параметров, что позволяет снизить величину необходимого резерва по регулирующему параметру и уменьшить дисперсию состава чугуна. Тем самым, наряду с экономией природного газа создаются предпосылки для экономии кокса за счет возможности снижения средней температуры чугуна при сохранении содержания серы на прежнем уровне.

Рассмотрены вопросы использования ильменитовых концентратов (медведевского концентрата и концентрата из хвостов обогащения Кусинской обогатительной фабрики), как сырья для производства пигментного диоксида титана. Проведены многочисленные лабораторные исследования по изучению влияния температуры и времени обжига ильменитовых концентратов на восстановление железа до закиси с целью определения возможности последующей переработки

концентратов на пигментный диоксид титана по автоклавной технологии. В лабораторных условиях определены оптимальные температура и время восстановительного обжига исходя их полного перевода трехвалентного железа в двухвалентное. Выполнена оценка теплотехнических параметров обжига концентратов во вращающейся печи - расход топлива, состав газовой фазы и др. Челябинским филиалом АО НПФ "ПИГМЕНТ" показано, что пигментный диоксид титана марки Р-1, получаемый по автоклавной технологии из ильменитового концентрата из хвостов обогащения Кусинской обогатительной фабрики, имеет белизну 95,5-96,0 усл. ед. и разбеливающую способность 1700-1750 усл. ед., что приближается к уровню мировых стандартов. Также показано, что при переработке ильменитового концентрата по технологии двойного гидролиза достигается максимальная степень очистки от хрома, что позволяет получить пигментный диоксид титана с в высокой белизной (96,2-96,5), отвечающей требованиям мировых стандартов [7,8].

Исследован процесс извлечения диоксида титана и других компонентов из доменного шлака НТМК азотнокислым способом в сравнении с результатами аналогичной переработки доменных шлаков ЧусМЗ. Установлено, что доменные шлаки НТМК и ЧусМЗ практически не отличаются по составу. Качество концентрата диоксида титана, полученного из доменного шлака НТМК (53,5-57,7 % TiO_2), значительно хуже, чем из шлака ЧусМЗ (85,4 % TiO_2). Для повышения качества концентрата диоксида титана шлак НТМК необходимо предварительно гранулировать в струе воды при температуре жидкого шлака не ниже 1400°C . В качестве побочных продуктов при переработке доменных шлаков НТМК могут быть получены концентраты на основе оксидов алюминия (87 % Al_2O_3), магния (79,9 % MgO), жидкое стекло ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,8\text{SiO}_2$) и кальциевая селитра (99,6 % $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Лабораторными исследованиями на образцах доменных шлаков НТМК и ЧусМЗ подтверждена возможность их переработки азотнокислым способом без отходов [9,10].

Предложена технология переработки марганцовистых ванадиевых шлаков. Данная технология переработки ванадиевых шлаков позволит извлекать ванадий на 95 %. Имеет замкнутый водооборот, является безотходной и претендует на экологически чистую. Сода используется только в начале пускового периода, далее сода образуется в процессе осаждения ванадия и используется в голове процесса. В результате технологии переработки шлаков получают V_2O_5 и побочный продукт NH_4OH . По разработанной технологии получена в лаборатории опытная партия пентоксида, содержащего 99,6-99,8 % V_2O_5 . Организация производства ванадия повышенной чистоты позволит ликвидировать зависимость отечественной промышленности от конъюнктуры мирового рынка и согласно технико-экономическим расчетам существенно снизить затраты на производство титановых и алюминиевых сплавов [11,12].

3.1.2. Программы курсов по специальным дисциплинам для бакалавров и магистров по направлению металлургия, в которых использованы разработки по данному проекту

Материалы работ, выполненных в ИМЕТ УрО РАН в рамках государственного контракта Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина с министерством образования и науки РФ № 02.740.11.0152 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2011 годы, внедрены в учебный процесс на кафедре «Металлургия железа и сплавов» в ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» для подготовки:

1. Инженеров по направлению 651300 – Металлургия, специальность 110100 – Металлургия черных металлов по курсам:
 - а. «Проблемы использования комплексного металлургического сырья Урала». Используются технологические решения: особенности доменной плавки титаномagnetитов, выплавки низкокремнистых чугунов, способы извлечения титана и ванадия.
 - б. «Высокие технологии в металлургии». Используемые технологические решения изложены в разделе 3.2.
 - в. «Управление технологическими процессами получения чугуна». Используются технологические решения: комплекс математических моделей, использование комплексных технологических параметров и способа замкнутого регулирования доменной плавки.
2. Бакалавров и магистров по направлению 150100 – Металлургия, специальность 550513 – Физико-химия и теплофизика металлургических процессов и материалов:
 - а. «Высокие и наукоемкие технологии в металлургии». Используются технологические решения: технология доменной плавки с использованием пылеугольного топлива, высокопотенциального тепла, комбинированного дутья высоких параметров.
 - б. «Теоретические основы перспективных металлургических процессов и технологий (Современные проблемы науки и производства в металлургии)». Используются технологические решения: расчет минимального расхода кокса в доменной плавке, использование высокопотенциального тепла в доменной плавке, использование пылеугольного топлива в доменной плавке, методика анализа эффективности работы доменных печей, применение математических моделей для анализа работы доменного процесса.

3.2. Разработка научно-методических материалов по дисциплине «Высокие технологии в металлургии»

Для определения расчетным способом всех выходных параметров доменного процесса необходимо, как минимум, знать расход кокса, расход дутья, расход углерода на прямое восстановление (или состав газа). Для нахождения этих трех величин надо составить три уравнения - тепловой баланс, включающий потери тепла, совмещенный с материальным балансом (поскольку расчеты ведутся на единицу массы чугуна), материальный баланс углерода, степень использования газа (или степень прямого восстановления). Сложным моментом здесь, наряду с определением потерь тепла, является выбор между степенью прямого восстановления и степенью использования газа. Нужно учитывать и то, что балансовая модель должна быть способной как прогнозировать фактические показатели плавки, так и определять предел совершенствования технологии доменной плавки. В отношении степени прямого восстановления необходимо отметить, что здесь нет никаких логических зависимостей между ней и выходами доменного процесса, и даже при желании определить минимальный расход кокса неизвестно, чем задаваться, поскольку минимальное значение степени прямого восстановления (нуль) не означает минимального расхода кокса, а означает, например, низкую производительность при больших потерях тепла. В отношении степени использования газа задача существенно упрощается, по крайней мере, при определении минимального расхода кокса.

Предел совершенствования доменного процесса определяется термодинамическим равновесием в отдельных зонах печи. Выбор этих зон давно интересовал ученых-доменщиков. В таблице 3.1 и на рисунке 3.6 приведены предложенные для расчета минимального расхода кокса степени использования CO. Видно, что существуют большие различия как в величине степени использования оксида углерода, так и в виде определяющего расход кокса оксида железа. Из перечисленных в таблице 3.1 авторов только А.Н. Рамм и последующие довели дело до практических расчетов.

Таблица 3.1 - Равновесные степени использования СО и определяющие виды оксидов железа при определении минимального расхода кокса

Авторы	Литературный источник	η_{CO}	Определяющий оксид	Номер точки на рисунке 2
Лейбович М.М.	[13]	50	Fe_3O_4	1
Рамм А.Н.	[14]	50	Fe_3O_4	1
Аустин Д.	[15]	32	FeO	2
Мартин П.	[16]	49	Fe_2O_3	3
Любан А.П.	[17]	43	FeO	4
Костылев Н.А.	[18]	63	Fe_2O_3	5
Рамм А.Н.	[19,20]	55-63	Fe_3O_4	5-6
Рист А. и др.	[21]	30	FeO	7
Рист А. и др.	[10]	42	FeO	8
Захаров И.Н. и др.	[23-24]	40,5	Fe_3O_4	С
Логинов В.И. и др.	[27-29]	30,9	FeO	9

К информации, представленной в таблице 3.1, добавим следующее. Предположение о равновесии в работе [14] А.Н. Рамм развил в работах [19,20], где расход кокса определяется из условия стадийного (последовательного) восстановления Fe_3O_4 и FeO при достижении равновесного состава газа на каждой стадии, причем вводится соотношение между степенями использования газа на этих стадиях и степенью прямого восстановления.

А. Рист с сотрудниками разработал математическую модель доменного процесса, основанную на тепловом и материальном балансах и условии термодинамического равновесия [21]. Первоначально эта модель не получила широкого распространения. Впоследствии ее широко разработали Дж. Писи, В. Давенпорт в Канаде [25] и И.Ф. Курунов в России [26]. В работе [21] А.Рист с сотрудниками предполагали равновесие на стадии восстановления FeO ($t=950^\circ\text{C}$, $\eta_{\text{CO}} = 30\%$). Впоследствии [22] они пришли к выводу, что при высокой восстановимости железорудной шихты равновесие достигается при температуре 670°C . Дополнительная экономия кокса по сравнению с температурой 950°C составляет 56 кг.

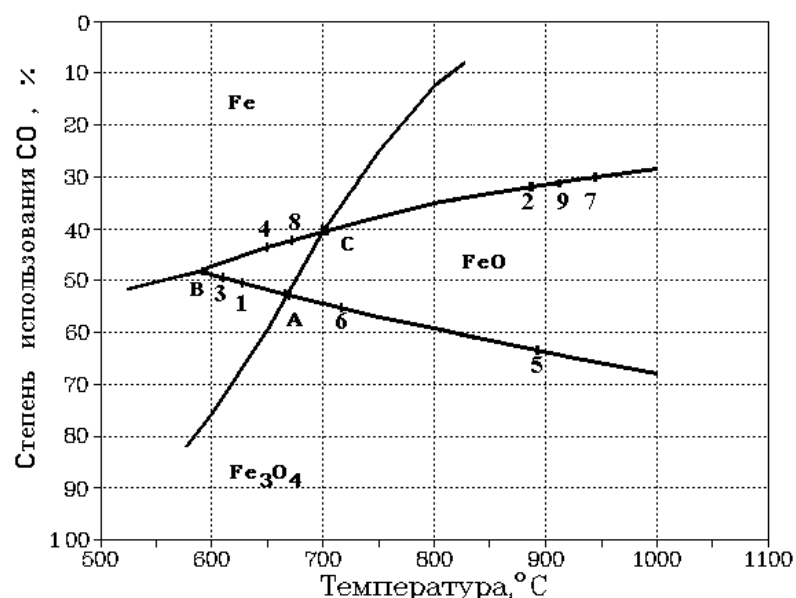


Рисунок 3.6 - Равновесные степени использования газа, принимаемые при расчетах минимального расхода кокса (номера точек - в таблице 1)

Наименее логически противоречивым представляется предложение использовать при расчетах минимального расхода кокса предположение о равновесии в точке С (рисунок 3.6), а за определяющий оксид брать Fe_3O_4 [23,24]. Таким образом, увязываются следующие факты - в доменных печах России, работающих с низким расходом кокса, состав газа на стадии восстановления Fe_3O_4 близок к равновесному составу по реакции восстановления FeO ; в связи с недостаточным уровнем подготовки шихты (конкретно восстановимость) существует зональный режим восстановления, при котором в основной массе куска железорудного материала находится Fe_3O_4 , а на поверхности - FeO , и состав газа соответствует равновесному по этой реакции; существует реакция регенерации CO_2 . В работах [23,24] аналогично равновесию при восстановлении CO принимается равновесие при восстановлении водородом.

Повышение восстановимости железорудного сырья позволяет, по нашему мнению, реализовать стадийный режим восстановления, при котором восстановление оксидов железа происходит последовательно $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$. При этом достигается действительное равновесие на стадии восстановления магнетита, при котором состав газа соответствует равновесному по этой реакции (рисунок 3.7, точки А и А').

В таблице 3.2 приведены основные показатели доменной плавки, рассчитанные для вариантов зонального и стадийного восстановления.

Из анализа таблицы следует, что при переходе от зонального к стадийному режиму восстановления, вследствие повышения восстановимости, снижается степень прямого восстановления, повышается степень использования газа, увеличивается использование углерода,

в результате чего расход кокса снижается на 70 кг/т чугуна. В этом случае кокс наиболее полно используется и как восстановитель, и как теплоноситель.

Восстановимость железорудного материала определяется, при прочих равных условиях, скоростью диффузии газа-восстановителя. Скорость газа в свою очередь зависит от пористости материала. При зональном режиме восстановление различных оксидов железа совмещается во времени. При стадийном режиме восстановление различных оксидов железа происходит последовательно.

На рисунке 3.8 показана схема зонального и стадийного восстановления кусков железорудного материала.

Таким образом, теоретические исследования однозначно подтвердили характер влияния восстановимости железорудного сырья на показатели доменной плавки. Улучшение процессов восстановления в доменной печи за счет повышения качества железорудного сырья заключает в себе основной резерв экономии кокса.

Таблица 3.2 - Показатели доменной плавки,
рассчитанные по условиям равновесия

Показатели плавки	Расчет по условию равновесия в точке	
	С (зональный режим)	А (стадийный режим)
Условие равновесия: температура, °С	700	668
$\eta_{\text{CO}}, \%$	40,5	52,5
$\eta_{\text{H}_2}, \%$	30,5	38,0
Расход кокса, кг/т чугуна	494	424
Расход дутья, м ³ /т чугуна	1154	1037
Выход шлака, кг/т чугуна	643	628
Колошниковый газ: температура, °С	120	87
состав, %: CO	26,66	20,25
CO ₂	20,78	26,25
H ₂	4,12	4,07
N ₂	48,44	49,43
выход, м ³ /т чугуна	1709	1504
Степень прямого восстановления $r_d, \%$	36,8	24,3
Коэффициент полезного действия тепла $K_d, \%$	93,3	94,2
Коэффициент использования углерода $K_c, \%$	59,4	68,3

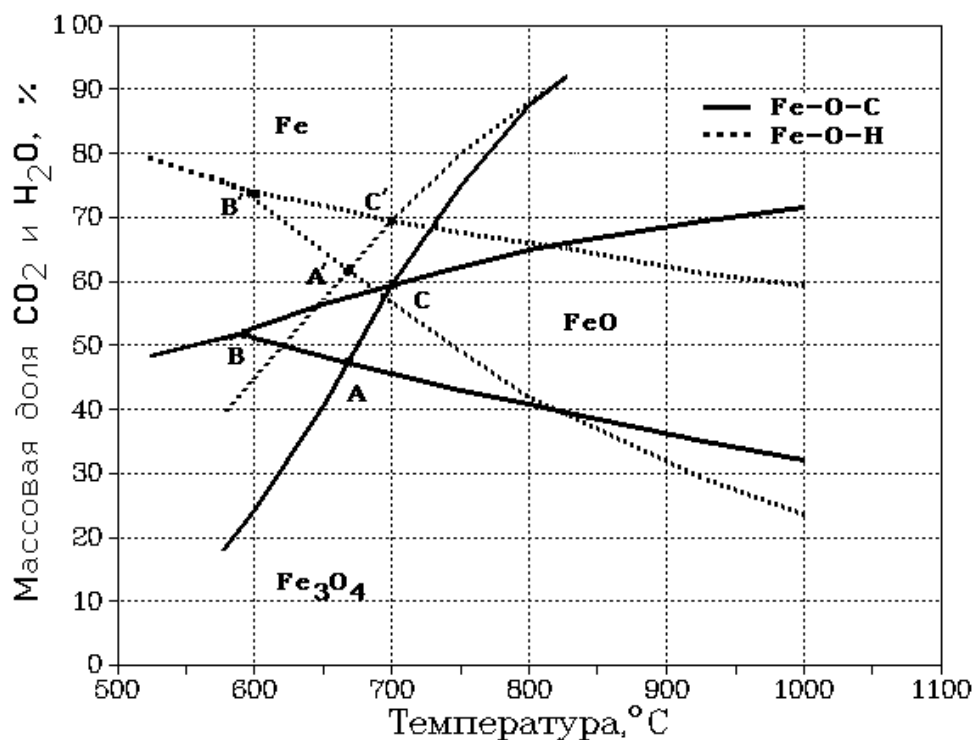


Рисунок 3.7 - Диаграмма равновесия

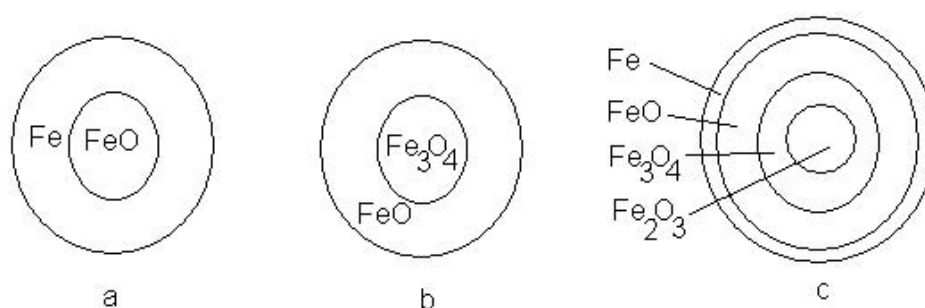


Рисунок 3.8 - Схема стадийного (a, b) и зонального (c) восстановления

Доменная печь – основной агрегат для получения чугуна, являющегося в свою очередь сырьем для получения стали. Таким образом, реализуется основная схема передела железорудного сырья “доменная печь - конвертер”. В доменной плавке расходы на кокс составляют около 40 % затрат на получение чугуна и оказывают значительное влияние на его себестоимость. Поэтому существенное сокращение расхода кокса при минимизации общих энергозатрат должно рассматриваться как важная проблема при совершенствовании технологии доменной плавки.

Как уже было отмечено, расход кокса в доменной плавке, как энергоносителя (источник тепла и восстановителя), может снижаться, в основном, двумя путями.

Во-первых, за счет использования экстенсивных факторов – повышение содержания железа в шихте, использование прямых заменителей кокса (природного газа, мазута, угольной пыли, восстановительного газа, в том числе колошникового с отмывкой его от диоксида углерода), увеличение температуры дутья, высокопотенциального тепла (использование плазмотронов) и т.д.

Во-вторых, за счет использования интенсивных факторов – повышение степени использования теплового и восстановительного потенциала газа в результате улучшения качества железорудного сырья и кокса, характеризуемого восстановимостью, прочностью, температурами размягчения и плавления для железорудного сырья, реакционной способностью для кокса.

Предел совершенствования доменного процесса, включающий в свое понятие минимальный теоретически возможный расход кокса, определяется термодинамическим равновесием окислительно-восстановительных реакций в отдельных зонах печи.

Несомненно, интересно знать, насколько эффективно используются энергоносители в доменной плавке (кокс, природный газ, кислород), то есть насколько процесс приближается к своему равновесному значению.

Определить минимальный (равновесный) расход кокса можно, например, с помощью предложенной нами математической модели [30]. В основе математической модели лежат следующие предпосылки. Теплообмен в доменной печи завершен, т.е. на определенной части высоты существует малый перепад температур между газом и шихтой. В определенной зоне печи на стадии восстановления магнетита (Fe_3O_4) реакция восстановления вюстита (FeO) стремится к термодинамическому равновесию (в соответствии с рисунком 3.7, точки С и С'). Здесь реализуется так называемое зональное восстановление, когда восстановление различных оксидов железа совмещается по времени.

Решение системы уравнений для нижней зоны (с температурами выше точек С и С'), представленной условием термодинамического равновесия, а именно, константой равновесия реакции восстановления FeO оксидом углерода, материальным и тепловым балансами, дополненной уравнением теплового баланса для верхней зоны, позволяет рассчитать основные показатели доменной плавки. Определенные таким образом показатели являются предельно достижимыми (минимальными) при данных параметрах шихты и дутья.

На практике эффективность мероприятий, направленных на снижение расхода кокса, определяют путем приведения технико-экономических показателей опытного периода к базовому с помощью таблицы влияния технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи, например, [31]. Пользование такой таблицей имеет ряд недостатков, основными из которых являются:

1. Не учитывается конкретная совокупность сырьевых и дутьевых условий, объем доменных печей.
2. Присутствуют интервалы для входных параметров при задании коэффициентов компенсации.

Уже упомянутая модель [30] позволяет использовать принципиально другой подход. Поскольку рассчитанный с использованием математической модели расход кокса является предельно достижимым при существующих параметрах шихты и дутья, разность между фактическим $K_{\text{факт}}$ и расчетным $K_{\text{расч}}$ расходами кокса

$$\Delta K = K_{\text{факт}} - K_{\text{расч}}, \text{ кг/т чугуна} \quad (3.2.1)$$

характеризует эффективность работы доменной печи и представляет собой резерв снижения расхода кокса за счет повышения степени использования восстановительной энергии газа. Определение эффективности работы производится следующим образом (в соответствии с рисунком 3.9).

1. Резерв экономии кокса в периодах 1 и 2 ΔK_i

$$\Delta K_1 = K_{\text{факт1}} - K_{\text{расч1}}, \text{ кг/т чугуна}, \quad (3.2.2)$$

$$\Delta K_2 = K_{\text{факт2}} - K_{\text{расч2}}, \text{ кг/т чугуна}. \quad (3.2.3)$$

2. Эффективность мероприятий, направленных на снижение расхода кокса ΔK_{ii}

$$\Delta K_{12} = \Delta K_1 - \Delta K_2, \text{ кг/т чугуна}. \quad (3.2.4)$$

Знак рассчитанного ΔK_{12} означает: + - экономия кокса, – - перерасход кокса.

Таким образом, определяется разность между фактическим и расчетным (равновесным или минимальным) расходами кокса. Чем она меньше, тем лучше. Причем она (разность) может быть и отрицательной. Поскольку равновесное состояние является тем пределом, к которому должна стремиться работа любой доменной печи, то это равновесное состояние и может служить единой базой сравнения для всех доменных печей. Поэтому сравнением разностей ΔK_i можно анализировать не только работу одной доменной печи в разные периоды ее работы, но и разных печей, находящихся в различных шихтовых и дутьевых условиях.

Предложенная методика может быть использована:

- для оценки эффективности работы доменных печей;
- для анализа работы доменных цехов и оценки эффективности мероприятий, направленных на снижение расхода кокса, для этого необходимо проводить сравнение фактического и расчетного расходов кокса в сопоставляемых периодах.

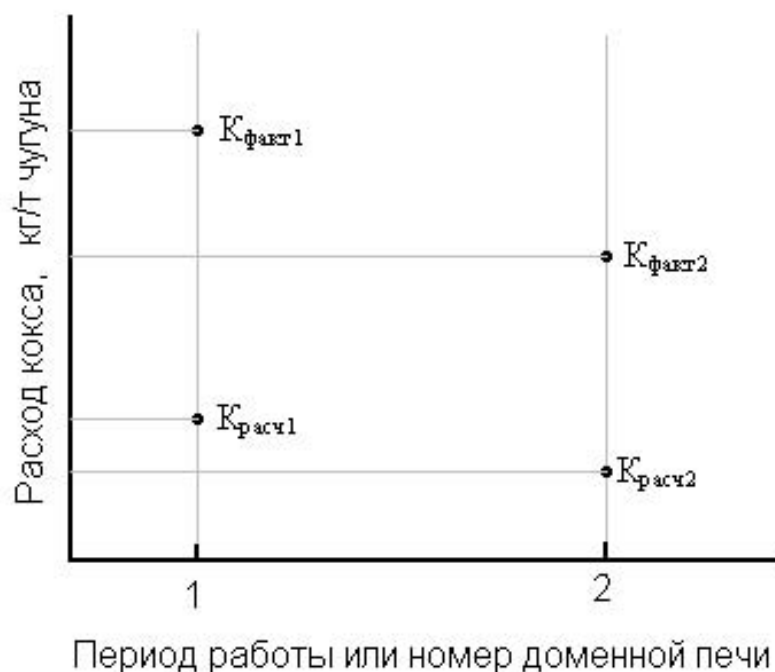


Рисунок 3.9 - Схема определения эффективности работы доменной печи

Расчетами установлено, что на большинстве доменных печей существует значительный резерв по снижению расхода кокса. Пути его уменьшения следующие:

- повышение прочности железорудного сырья, позволяющее совершенствовать газораспределение (снижать радиальную неравномерность) с целью повышения степени использования газа;
- увеличение восстановимости железорудного сырья, позволяющее приблизить степень использования газа на стадии восстановления магнетита к равновесной.

Впервые элементы данного подхода были применены нами для расчетного анализа эффективности работы доменных печей Всесоюзного производственного объединения (ВПО) “Союзметаллургпром” за 1976-1982 годах [32]. В результате этой работы согласно приказу № 137 от 06.06.83 Министерства черной металлургии СССР методику расчета было рекомендовано использовать для оценки эффективности работы доменных печей и эффективности мероприятий, направленных на снижение расхода кокса. Впоследствии мы использовали этот подход для анализа эффективности работы доменных печей ВПО “Союзметаллургпром” в 1986-1988 годах, при внедрении наших предложений по совершенствованию технологии доменной плавки на металлургическом заводе им. А.К. Серова, Карагандинском металлургическом комбинате, Нижнетагильском металлургическом комбинате и др.

3.3 Список использованных источников

1. Проведение экспериментальных исследований структуры и свойств металлических расплавов при переработке титано-магнетитового сырья. Отчет о НИР. ИМЕТ УрО РАН. 2009. 60 с.
2. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А. Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
3. Дмитриев А.Н., Шумаков Н.С., Леонтьев Л.И., Онорин О.П. Основы теории и технологии доменной плавки. Екатеринбург: УрО РАН, 2005.
4. Шатлов В.А., Фофанов А.А., Дмитриев А.Н., Волков В.В., Кондаков М.Н., Лейсов Е.И. Снижение расхода кокса в доменных печах в результате более полного использования химической энергии газа / - М., 1983 (Экспресс-информация/ ин-т “Черметинформация”, 27 с.).
5. Разработка математических моделей и программного обеспечения для научных и инженерных расчетов температурных полей в доменной печи. Отчет о НИР. ИМЕТ УрО РАН. 2010. 96 с.
6. Разработка новых технологических решений извлечения ценных компонентов ванадия и титана при переработке титано-магнетитового сырья. Отчет о НИР. ИМЕТ УрО РАН. 2010. 49 с.
7. Патент РФ № 2001138 от 15.10.93. Способ переработки лейкоксенового концентрата. Алексеев Л.Ф., Берсенева А.М., Ватолин Н.А., Дмитриев А.Н., Леонтьев Л.И., Пряхина Т.А., Самойлова Г.Г., Сапожникова Т.В., Ченцов А.В., Шаврин С.В. Заявл. 03.07.91 № 5003247.
8. Патент РФ № 2068393 27.10.96. Способ переработки лейкоксенового концентрата. Алексеев Л.Ф., Ватолин Н.А., Дмитриев А.Н., Леонтьев Л.И., Пряхина Т.А., Самойлова Г.Г., Сапожникова Т.В., Ченцов А.В., Шаврин С.В., Шахпазов Е.Х. Заявл. 11.01.93 № 93002060.
9. Кожевников Г.Н., Водопьянов А.Г., Шаврин С.В., Леонтьев Л.И., Столяров Ю.В. / Патент 2167820. Россия. Способ переработки титансодержащих материалов. Бюлл. № 15 от 27.05.2001.
10. Кожевников Г.Н., Водопьянов А.Г., Шаврин С.В., Леонтьев Л.И., Столяров Ю.В. / Патент 2215053. Россия. Способ переработки титансодержащих шлаков. Бюлл. № 30 от 27.10.2003.
11. Ватолин Н.А., Халезов Б.Д., Леонтьев Л.И. и др. / Пат. 2228965. Россия. Способ извлечения ванадия из ванадийсодержащих материалов. Бюлл. изобретений, 2004. № 14.
12. Ватолин Н.А., Халезов Б.Д., Тетюхин В.В. и др. / Пат. 23488716. Россия. Способ извлечения ванадия. Бюлл. изобретений, 2009. № 7.
13. Лейбович М.М. О теоретическом расходе углерода при выплавке чугуна // Metallurg, 1936, № 3 и № 4.
14. Рамм А.Н. Определение расхода горючего при выплавке чугуна и теоретически возможной наименьшей величины его // Советская металлургия, 1936, № 4. С.13-30.
15. Austin J.B. //Iron and Steel Engineer, 1939, v.16, № 7. P.31-42.
16. Martin P.V. //Blast Furnace and Steel Plant, 1939, v.27, № 7. P.669-673.
17. Любан А.П. Анализ явлений доменного процесса. М.: Металлургиздат, 1955. С.154-162.

18. Костылев Н.А. Очерки по теории доменного процесса. М.: Металлургиздат, 1945. С.17-20.
19. Рамм А.Н. О минимальном теоретически возможном расходе кокса при выплавке чугуна в современных условиях //Сталь, 1964, № 10. С. 860-871.
20. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. С.91-99.
21. Rist A., Meysson N. Etude graphique de la marche du haut fourneau avec vent humide et injection aux tuyeres //Revue de metallurgie, 1965, № 11. P.955-1039.
22. La redaction dans le haut fourneau et la recherche des tres faibles au mille de coke /Nicolle R., Capelani R., Guillot J.B., Rist A. //Revue de metallurgie, 1980, v.77, №10. P.769-779.
23. Захаров И.Н., Яковлев Ю.В., Новиков В.С. Равновесные состояния и расходные коэффициенты в доменной плавке //Известия АН СССР, Металлы, 1979, № 2. С.12-19.
24. Равновесные состояния и расход кокса в доменной плавке /Федулов Ю.В., Захаров И.Н., Яковлев Ю.В., Лежнев Г.П., Дмитриев А.Н.// Сталь, 1981, № 1. С.13-18.
25. Писи Дж.Г., Давенпорт В.Г. Доменный процесс. Теория и практика. М.: Металлургия, 1984. 142 с.
26. Курунов И.Ф., Фурсова Л.А. Технология и оборудование металлургического производства //Производство чугуна и ферросплавов (учебное пособие). М.: Изд. МИСиС, 1980. 56 с.
27. Логинов В.И., Парфенов А.И., Мусиенко К.А. Техничко-экономические возможности доменной плавки в условиях достижения равновесного состояния восстановления оксидов железа // Известия вузов. Черная металлургия, 1988, № 10. С.13-17.
28. Логинов В.И., Парфенов А.И., Мусиенко К.А. Влияние технологических факторов на технико-экономические возможности доменной плавки в условиях достижения равновесного состояния восстановления оксидов железа// Известия вузов. Черная металлургия, 1988, № 12. С.25-28.
29. Логинов В.И., Мусиенко К.А. Связь процессов восстановления с расходом кокса в доменной плавке // Известия АН СССР. Металлы, 1989, № 4. С.11-15.
30. Дмитриев А.Н. Балансовая (равновесная) математическая модель. - В кн.: Математическое моделирование доменного процесса. Научные доклады / Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, 1994, с.3-5.
31. Остроухов М.Я., Шпарбер Л.Я. Справочник мастера-доменщика. М.: Металлургия, 1977. 304 с.
32. Шатлов В.А., Фофанов А.А., Дмитриев А.Н. и др. Снижение расхода кокса в доменных печах в результате более полного использования химической энергии газа. - М., 1983 (Экспресс-информация/ ин-т "Черметинформация", 27 с.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты 5-го этапа НИР:

1. В области разработка информационно-моделирующих систем по управлению технологическими режимами выплавки чугуна в доменных печах и их комплексов:

 - С учетом требований инженерно-технологического персонала и использованием системного подхода разработана функциональная модель автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха (АИС АППС ДЦ) Произведена структурная декомпозиция АИС АППС ДЦ, что позволило выделить следующие подсистемы:
 - сбора, первичной обработки и хранения данных;
 - визуализации данных о работе доменной печи;
 - формирования технического отчета о работе доменных печей и цеха;
 - сопоставительного анализа работы доменных печей и цеха;
 - модельной поддержки принятия решений, диагностики работы доменных печей и прогнозирования технологических ситуаций.
 - Показана целесообразность с учетом специфики решаемых задач в основе модели использования принципа натурно-математического моделирования. Модель можно разделить на две части – модель базового состояния и проектную модель. Модель базового (эталонного) состояния позволяет оценивать состояние процесса по фактическим усредненным показателям за базовый (эталонный) период работы печи. При этом используется фактически доступная информация о работе печи: параметрах шихты, комбинированного дутья, колошникового газа и продуктов плавки и др. Проектная же модель с использованием результатов, полученных с помощью модели базового (эталонного) состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров.
 - Создано математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение АИС АППС ДЦ. Разработанное обеспечение позволяет формировать полный набор отчетных показателей работы доменных печей и цеха и решать технологические задачи по управлению тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной плавки.
 - Разработаны архитектура и структура программных модулей АИС АППС ДЦ, выполнены кодирование и отладка программного обеспечения подсистем отображения данных, формирования и сопоставления отчетных показателей о работе доменных печей и цеха,

модельных систем оценки теплового, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки.

- Сформулирована общая последовательность задач оптимального распределения природного газа в группе доменных печей с учетом индивидуальных особенностей теплового, газодинамического и шлакового режимов работы доменных печей, а также их конструктивных и режимных параметров. Показано, что в рамках решаемых при этом задач целесообразно использовать линеаризованные соотношения и линейное математическое программирование.
 - Выполнена математическая постановка задач распределения параметров комбинированного дутья в группе доменных печей с учетом ограничений:
 - на работу цеха по суммарным расходам природного газа, кокса, требуемому объему выплавки чугуна;
 - индивидуальных технологических ограничений на каждую из печей цеха (тепловое состояние верхней и нижней части печи, газодинамический и шлаковый режимы плавки, качество выплаваемого чугуна).
 - Показано, что разработанное программное обеспечение системы распределения природного газа в группе доменных печей позволяет оперативно решать оптимизационные задачи, исследовать влияние различных факторов на процесс выплавки чугуна в доменных печах, обладает возможностью совершенствования и внесения изменений с учетом тепловых, газодинамических, технологических и других факторов.
 - Интегрированы созданные система в существующую информационную структуру металлургического предприятия и позволяет на основе имеющейся фактической отчетной информации осуществлять анализ и прогнозирование производственных ситуаций в доменном цехе, а также решать комплекс технологических задач.
2. *В области разработки принципов построения и структуры системы управления совмещенным процессом прессования-прокатки-регламентированного охлаждения профилей и труб:*
- Создана математическая модель температурного режима совмещенного процесса прессования – прокатки – термической обработки труб, структура системы и алгоритм управления формоизменением сечения трубы и температурой трубы на входе в закалочное устройство
 - Разработано соответствующее программное обеспечение, применение которого показало принципиальную и техническую возможность прямого совмещения технологических операций, с целью получения труб, в частности из коррозионно-стойких сталей,

предготовых размеров без нагревов (кроме прессового) и промежуточных термических и химических обработок.

- Предложена двухуровневая система автоматического управления температурно-скоростным режимом и натяжениями как на выходе из пресса, так и межклетевыми гарантирующая обеспечение на выходе из прокатного стана требуемой толщины стенки трубы.
 - Показана на конкретном примере прокатки трубы из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса возможность существенного увеличения скорости редуционно-растяжной прокатки. Установка управляемых экранов и системы водяного охлаждения трубы по ходу ее передачи от пресса к стану и при движении вдоль линии прокатки устраняет опасность перегрева.
 - Установлено, что структура системы и алгоритм управления, быстро реализуемый традиционными программными средствами. Это позволяет до минимума сократить количество датчиков оперативной информации и повысить быстродействие и надежность системы управления.
 - Разработано техническое предложение по созданию на ОАО «Первоуральский новотрубный завод» комплекса оборудования для изготовления теплообменных труб из коррозионно-стойких сталей. Предложенная технология сокращает количество промежуточных отжигов и полностью устраняет химическую обработку труб, что существенно снижает энерго- и ресурсопотребление.
 - Результаты исследований процесса прямого совмещения прессования с редуционно-растяжной прокаткой использованы при разработке совместно с ОАО «Уралгиромез» технологического задания 1У-60151-ТЛЗ1 на проектирование технологии и комплекса оборудования участка по безотходной переработке титаномагнетитовых песков на ООО «Экомет» при КТЭЦ-2 г. Петропавловск-Камчатский.
3. *В области разработки программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс и научно-методических материалов по дисциплине «Высокие технологии в металлургии»:*
- новые разработки в области исследования структуры и свойств металлических и шлаковых расплавов, инженерных расчетов температурных полей в доменной печи, использования информационно-моделирующих систем для управления доменным процессом, извлечения ценных компонентов ванадия и титана при переработке титано-магнетитового сырья использованы для совершенствования образовательного процесса;
 - подготовлены научно-методические материалы по курсу «Высокие технологии в металлургии».

ПРИЛОЖЕНИЕ

В приложении представлены отчетные документы по хоздоговорным работам, выполненным на этапе №5 ГК № 02.740.11.0152, в которых отражены результаты разработки практических рекомендаций и опытно-промышленных испытаний компьютерной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

В рамках проведения этапа №5 выполнены следующие хоздоговорные работы:

1. «Исследование работы и прогнозирование производственных ситуаций доменного цеха на основе разработки программного комплекса» НИР №0483.
2. Техническая поддержка программного комплекса анализа результатов работы и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха ОАО «ММК»» НИР №023.